



GOBIERNO DE  
**MÉXICO**

MEDIO  
AMBIENTE

SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE  
Y RECURSOS NATURALES



**CONAGUA**

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA



# Servicio Meteorológico Nacional, Tiempo y clima

SERVICIO  
METEOROLÓGICO  
NACIONAL,  
TIEMPO Y CLIMA

Comisión Nacional del Agua

Servicio Meteorológico Nacional, tiempo y clima

D. R. © Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales  
Boulevard Adolfo Ruiz Cortines No. 4209 Col. Jardines en la Montaña,  
C. P. 14210, Tlalpan, Ciudad de México

Comisión Nacional del Agua  
Insurgentes Sur No. 2416 Col. Copilco El Bajo  
C.P. 04340, Coyoacán, Ciudad de México  
Tel. (55) 5174-4000

Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional

Impreso y hecho en México

Distribución gratuita. Prohibida su venta.

Queda prohibido el uso para fines distintos al desarrollo social. Se autoriza la reproducción sin alteraciones del material contenido en esta obra, sin fines de lucro y citando la fuente.

# ÍNDICE

CAPÍTULO 1 .....	11
HISTORIA DEL SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL	
CAPÍTULO 2 .....	37
METEOROLOGÍA	
CAPÍTULO 3 .....	59
LA ATMÓSFERA	
CAPÍTULO 4 .....	81
LAS NUBES Y LOS FENÓMENOS METEOROLÓGICOS	
CAPÍTULO 5 .....	97
FENÓMENOS EXTREMOS DE TIEMPO SEVERO Y SUS EFECTOS EN MÉXICO	
CAPÍTULO 6 .....	131
CLIMATOLOGÍA	
APÉNDICE .....	181
FUENTES BIBLIOGRÁFICAS, HEMEROGRÁFICAS, REFERENCIAS WEB, CRÉDITOS FOTOGRÁFICOS Y SIGLAS Y ACRÓNIMOS .....	182



# Mensaje

México es uno de los países con mayor riqueza climática, hidrológica y ambiental. Esto se debe a que por un lado, estamos ubicados en la franja de los grandes desiertos del mundo, lo que nos hace propensos a sequías intensas; y por otro, en las cercanías de nuestras costas se forman los ciclones tropicales que nos dan gran parte del agua que utilizamos, aunque su fuerza y magnitud genera amplios riesgos de inundaciones.

Estos fenómenos coexisten en nuestro territorio, provocando grandes contrastes y vulnerabilidades, que se agudizan con el cambio climático y se suman a los grandes retos hídricos de nuestro tiempo.

Por ello, el Servicio Meteorológico Nacional es una de las instituciones de mayor importancia para el desarrollo nacional. Su tarea cotidiana permite que la Comisión Nacional del Agua de avisos oportunos, active los protocolos de actuación adecuadamente y se coordine con las autoridades de protección civil para fortalecer la salvaguardar y seguridad física y patrimonial de las mexicanas y los mexicanos.

Ante la importancia de su labor, y para mejorar sus capacidades de prevención y mitigación de riesgos, el Gobierno de México impulsa su modernización, con la implementación de nueva tecnología de medición y monitoreo, la formación de personal mejor capacitado y especializado, la construcción de nuevas plataformas de intercambio de información, y el establecimiento de nuevos protocolos y procesos de actuación y coordinación interinstitucional.

Todas estas acciones permitirán contar con más y mejor información hidrometeorológica, para que la toma de decisiones en las diferentes órdenes de gobierno sea más certera y oportuna.

Este libro es un testimonio y un reconocimiento al trabajo que realiza la 24 horas del día el personal de esta institución, en beneficio de todas y todos los mexicanos.

**Blanca Jiménez Cisneros**

Directora General de la Comisión Nacional del Agua





Mr. José Solís  
Coordinador General de Evaluación y  
Seguimiento







## **Agradecimiento**

A todos los trabajadores del Servicio Meteorológico Nacional, que a lo largo del tiempo han hecho de esta una institución fundamental para las y los mexicanos.

Sin sus valiosos conocimientos y asesoría, este libro no hubiera sido posible.



# CAPÍTULO 1 HISTORIA DEL SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL

Vista del Castillo de Chapultepec a finales del siglo XIX.

## LOS PRIMEROS AÑOS

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) surgió de la iniciativa de Vicente Riva Palacio, titular de la Secretaría de Fomento, de combinar todos los estudios sobre el tiempo y el clima del país, realizados por científicos, intelectuales y particulares. Y por instrucción del entonces Presidente Porfirio Díaz, que buscó dar a México las bases y el impulso para entrar a la modernidad, a través de la inversión extranjera ofreciendo estudios integrales del suelo y subsuelo.

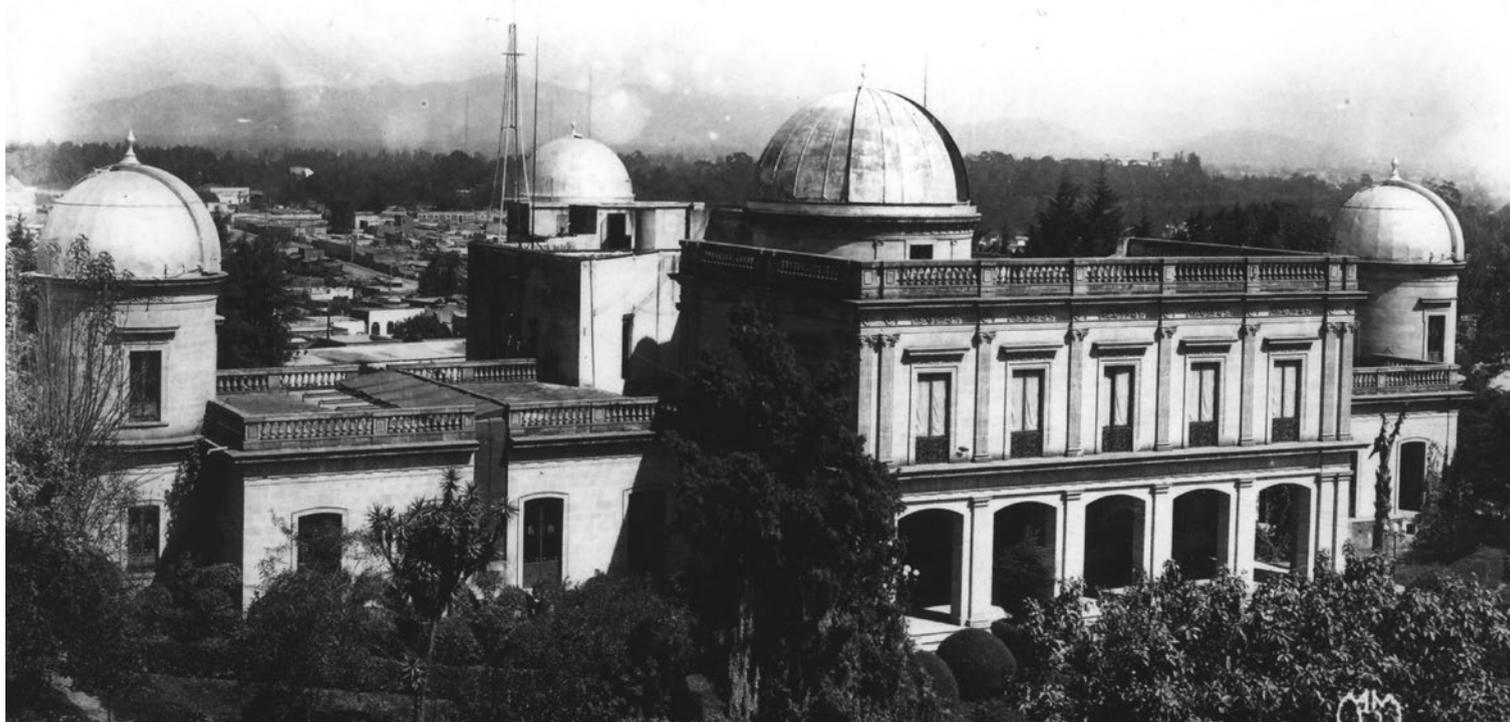
El 6 de marzo de 1877 se decretó la fundación del Observatorio Meteorológico Central, con el ingeniero Mariano Bárcena como su primer director. Misma que se consolidó con la instalación de instrumentos de medición atmosféricas en la antigua garita de guardias ubicada en la azotea de Palacio Nacional, siendo esta su primera casa.

Poco tiempo después, junto con el Servicio Astronómico Nacional, migra al alcázar de Chapultepec. Ahí ocupó el espacio conocido como El Torreón del Caballero Alto, que es adaptado ex profeso para albergar a las dos instituciones.

Dado que estas áreas del saber científico entran en auge, el lugar se vuelve insuficiente, así, para finales del siglo XIX los equipos y aparatos astronómicos son llevados a la vieja Casa Arzobispal —localizada en la Villa de Tacubaya— y, en los primeros años del siglo XX, al Servicio Meteorológico Central.

Es de resaltar que la comunicación y la difusión que se dieron en los primeros años de vida del Observatorio se vieron beneficiadas por el uso del telégrafo y por las Oficinas Centrales de Correos; estas últimas emitían sellos con leyendas predefinidas como “buen tiempo a.m.” y “mañana lluvia p.m.” ofreciendo así un servicio extra, ya que la correspondencia era entregada casi el mismo día.

Entre los primeros aparatos con los que contó el Observatorio Meteorológico Central se encuentran un barómetro de mercurio —hoy bajo el resguardo del museo del SMN—, para medir la presión atmosférica; un psicrómetro August, de manufactura londinense, y termómetros de



Observatorio Nacional.

estrangulación<sup>1</sup>, para determinar la temperatura mínima y máxima del día. Para medir el nivel de la lluvia se vaciaba el líquido recolectado en una probeta graduada, además de emplearse un udómetro (pluviómetro) para pesarla. También existían un anemómetro francés con cuatro “cazuelas”, que medía la velocidad del viento, y un anemoscopio que indicaba su procedencia<sup>2</sup>. Para registrar la presión atmosférica, la temperatura del ambiente y la humedad relativa, así como la dirección y la velocidad del viento se tenía un registrador autónomo —obra del padre Angelo Secchi—, un aparato muy complejo y único para su tiempo. Y un sextante, para determinar las coordenadas astronómicas y la posición solar y de las estrellas.

Mariano Bárcena fue el primer director del Servicio Meteorológico Central. Ingeniero Ensayador por la Escuela de Minas en 1871. Realizó distintas tareas científicas, destacando como geólogo, vulcanólogo, botánico, geógrafo, agrónomo y meteorólogo. Nació en Ameca, Jalisco, el 25 de julio de 1842. Tras su muerte, el 10 de abril de 1899,

1 Cuando se llegaba a una temperatura mínima o máxima a lo largo del día, el mecanismo las marcaba con un filamento de hierro -que se encuentra dentro del tubo lleno de mercurio-, a semejanza de los mecanismos que hoy emplean los termómetros localizados dentro de la garita o abrigo meteorológico.

2 Esta flecha estaba montada sobre una rosa de los vientos, dividida en octas, para saber con exactitud la dirección de los vientos predominantes al instante de su observación.

lo relevó en el puesto Miguel E. Pastrana, quien además de emplazar nuevos observatorios a lo largo del país, inventó un aparato alternativo al nefoscopio<sup>3</sup> para medir las octas de nubosidad imperantes en la bóveda celeste.

Así entramos a los años de inicio de la revuelta para derrocar a Porfirio Díaz, no sin antes haber visto, en 1910, la inauguración del Observatorio Sismológico Nacional, a propósito de las fiestas del Centenario de la Independencia de México.

Ante los problemas de la Revolución Mexicana se cierra el Servicio Meteorológico en febrero de 1915, para ser reabierto a finales del mismo año. En ese turbulento periodo permanece como su director el ingeniero Miguel Pastrana. En tanto que el ingeniero y subsecretario de Fomento, Pastor Rouaix, deja bajo el arbitrio de dicha dependencia de gobierno a los Observatorios Astronómico, Meteorológico y Sismológico. Por desgracia siguen las diferencias políticas y las labores se ven interrumpidas en varias ocasiones, no llegan los sueldos y las deserciones no se dejan esperar, tanto que en 1924 el director del Servicio Astronómico declara:

La planta del personal se ha reducido al grado que hoy no figuran en ella astrónomos, ni ayudantes de astrón-

3 Actualmente ubicado en las instalaciones del SMN.



El Meteorológico vigila continuamente a la atmósfera.

nomos, ni suficientes auxiliares. Es difícil hacer en estas condiciones un trabajo efectivo y sistemático solamente por el director, aun contando con la buena voluntad y ayuda de los calculadores que siempre son valiosos.<sup>4</sup>

Es posible que por eso se cedieran los Observatorios Astronómico y el Sismológico a la recién constituida Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

### EL EDIFICIO

El recinto donde se alberga el Servicio Meteorológico Nacional, desde hace más de un siglo, fue una casa de campo que perteneció al clero, construida en 1737 por encargo del arzobispo de México y virrey de Nueva España don Juan Antonio de Vizarrón y Eguiarreta. Y a un costado, en lo que alguna vez fuera la huerta y donde ahora yacen la Escuela Nacional Preparatoria 4 de la UNAM y el museo de Geofísica, se ubicaron el Servicio Astronómico Nacional y el Servicio Sismológico Nacional.

El Servicio Meteorológico Nacional, al igual que el Astronómico y Sismológico, estando alojados en la Casa Arzobis-

pal le dieron a México un lugar muy especial, mundialmente reconocido en el ámbito histórico y científico.

### LAS FUNCIONES DEL METEOROLÓGICO

El Servicio Meteorológico Nacional es el organismo encargado de proporcionar información sobre el estado del tiempo a escala nacional y local en nuestro país. Depende de la Comisión Nacional del Agua, que a su vez forma parte de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

Al Meteorológico le corresponde la vigilancia continua de la atmósfera para identificar los fenómenos que pueden impactar en las actividades económicas y poner en riesgo la vida de las personas, de ahí que sea vital la comunicación con el Sistema Nacional de Protección Civil; así como la difusión de las condiciones del tiempo y asuntos climáticos al público a través de boletines, avisos y comunicados de prensa.

Durante la época de ciclones tropicales que abarca de mayo a noviembre en el Océano Pacífico y de junio a noviembre en el Atlántico, los avisos y comunicados de prensa se elaboran cada tres horas, de ser necesario. Lo que significa que el SMN mantiene bajo estrecha vigilancia los sistemas que causan efectos en el país.

Como órgano de investigación, el SMN elabora estudios climatológicos y meteorológicos que realiza el Banco

<sup>4</sup> Comisión Nacional del Agua, *Servicio Meteorológico Nacional: 135 años de historia en México*, 1<sup>o</sup> ed., México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012, pp. 3.

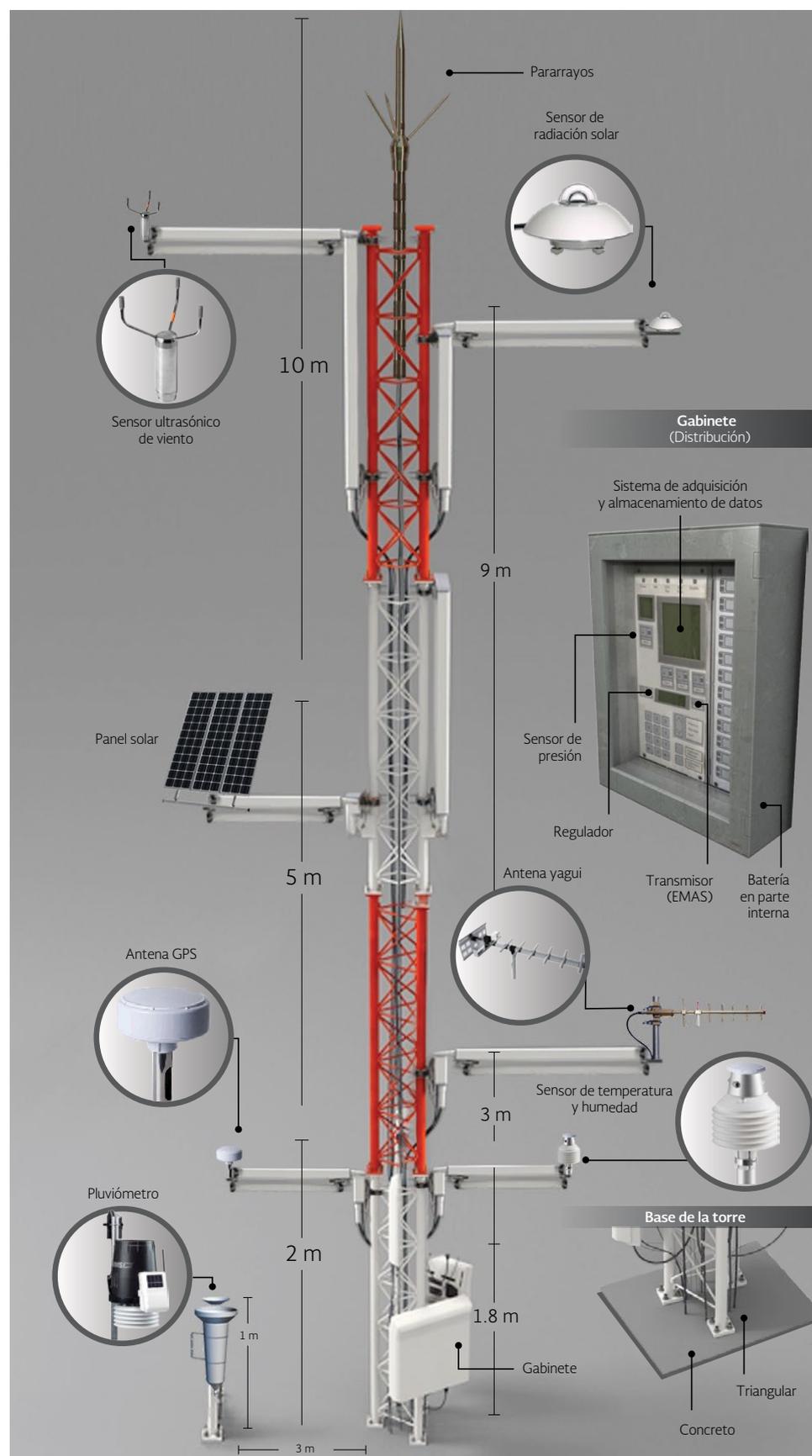


Diagrama de distribución de los sensores en una EMA.

Nacional de Datos Climatológicos, que puede ser consultado por cualquier persona.

El SMN difunde su información en forma de boletines, avisos especiales y comunicados de prensa a través de medios electrónicos al Sistema Nacional de Protección Civil de la Secretaría de Gobernación, de las secretarías de la Defensa Nacional, de Marina, de Medio Ambiente y Recursos Naturales, de Comunicaciones y Transportes, de Turismo, y de Salud; así como de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Petróleos Mexicanos, la Comisión Federal de Electricidad, el gobierno del Distrito Federal y los estados; universidades e instituciones educativas; medios masivos de comunicación, empresas, laboratorios, hospitales, aseguradoras, entre otros.

Como una de las formas de reforzar su trabajo de difusión, el SMN brinda visitas guiadas gratuitas a organismos educativos, institutos de investigación y público en general.

### INFRAESTRUCTURA METEOROLÓGICA Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA's)

Las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA's) son dispositivos automáticos compuestos por una serie de sensores que registran las variables atmosféricas, que se procesan y, posteriormente, se transmiten vía satélite a una base de datos ubicada en el SMN, en donde se almacenan para su estudio e interpretación como pronósticos meteorológicos, que serán difundidos en boletines y avisos para informar a la población y a las autoridades de los diversos órdenes de gobierno sobre el posible impacto en sus actividades y los riesgos.

Cada estación cuenta con sensores que miden:

1. Dirección y velocidad del viento
2. Temperatura del aire
3. Humedad relativa
4. Presión atmosférica
5. Precipitación pluvial
6. Radiación solar
7. Combustibilidad
8. Temperatura a 10 cm bajo suelo
9. Nivel de agua

La información que se recibe de las estaciones, también es utilizada con fines estadístico-climatológicos que permiten

Variables que reporta una EMA

Variable	Abreviatura	Descripción
1. Dirección del viento	DIRS	El valor obtenido es el promedio de 10 minutos (se toman mediciones cada 2 segundos) de la dirección del viento. La dirección indica de donde proviene el viento, su unidad de medición es en grados Dextrorsum (giro en sentido de las manecillas del reloj) donde 0° es Norte verdadero.
2. Velocidad del viento	VELS	La velocidad del viento es el promedio aritmético de las velocidades medidas en un lapso de 10 minutos (se toman mediciones cada 2 segundos), su unidad de medición para EMAs es en km/h, para ESIMEs es m/s.
3. Temperatura ambiente promedio	TEMP	Es la temperatura ambiente promedio de las mediciones realizadas en un lapso de 10 minutos (se toman mediciones cada minuto), su unidad de medición es en °C.
4. Humedad relativa	HR	La humedad relativa es el promedio de las mediciones realizadas en un intervalo de 10 minutos (se toman mediciones cada minuto), su unidad de medición es en porcentaje (%).
5. Presión atmosférica	PB	La presión atmosférica es el promedio de las mediciones realizadas en un lapso de 10 minutos (se toman mediciones cada minuto), su unidad de medición es el hpa (Hectopascal).
6. Precipitación	PREC	Es la lámina de precipitación acumulada en un lapso de 10 minutos, su unidad de medición es el mm (milímetro).
7. Radiación	RAD-SOL	La radiación solar (global) son los valores promedio medidos en un lapso de 10 minutos (se toman mediciones cada minuto), su unidad de medición es en W/m <sup>2</sup> (watt/m <sup>2</sup> ).
8. Temperatura bajo suelo	TEMP-subsuelo	Temperatura bajo suelo a 10 cm, son promedios de temperatura en lapsos de 10 minutos, (se toman mediciones cada minuto), su unidad de medición es en °C.
9. Humedad del suelo	HUMsuelo	La humedad del suelo a 10 cm, es el promedio de mediciones realizadas en un intervalo de 10 minutos (se toman mediciones cada minuto), su unidad de medición es en porcentaje (%).

a un gran número de instituciones, investigadores y particulares, que consultan al SMN, desarrollar trabajos de investigación o elaborar aplicaciones y desarrollo técnico.

Uno de los productos más útiles para los pronósticos son las gráficas de las variables meteorológicas de 24 horas de cada EMA.

Actualmente el Servicio Meteorológico Nacional cuenta con una red de 189 Estaciones Meteorológicas Automáticas, ubicadas en diferentes puntos de la República Mexicana y cuya instalación dio inicio en 1999.

Sin embargo, acorde a su proyecto de Modernización el SMN continuará incrementando el número de EMA'S por el territorio nacional para tener una cobertura más amplia, continua y precisa de las condiciones atmosféricas que dominan en México.

Estaciones Sinópticas Meteorológicas (ESIMES)

Son dispositivos automáticos compuestos por una serie de sensores que registran variables atmosféricas que se procesan y, posteriormente, se transmiten vía Internet en mensajes sinópticos cada tres horas, a una base de datos ubicada en el SMN. Ahí se almacenan y se procesan para realizar diversos estudios, destacándose los pronósticos meteorológicos.

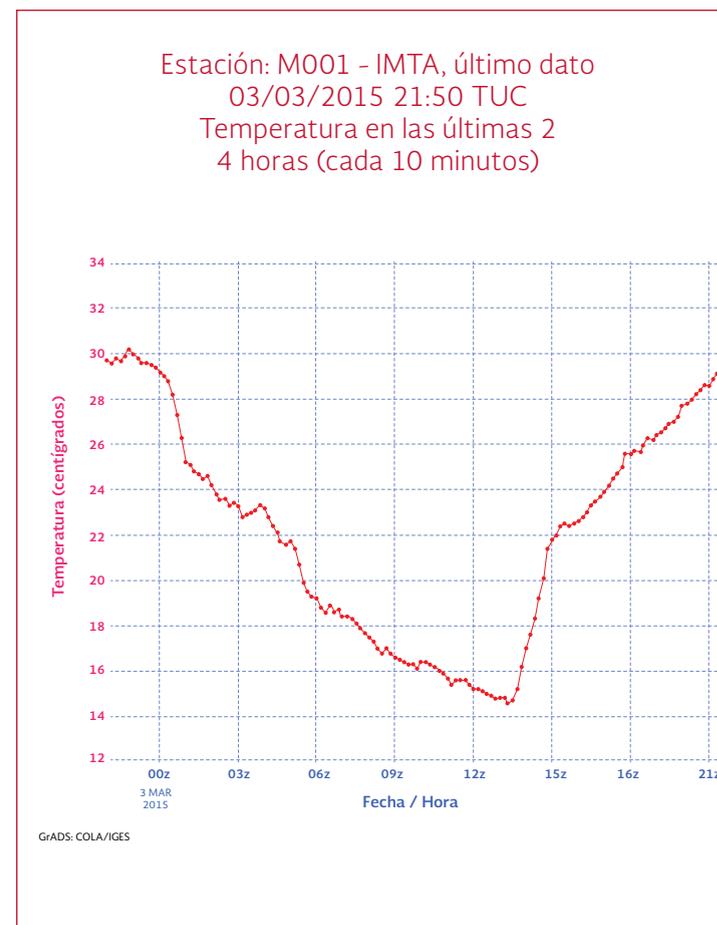


Gráfico de temperatura.



## Las Estaciones

Una Estación Sinóptica Meteorológica es un conjunto de dispositivos electrónicos que realizan mediciones de las variables meteorológicas de manera automática. Generan una base de datos y un mensaje sinóptico cada tres horas.

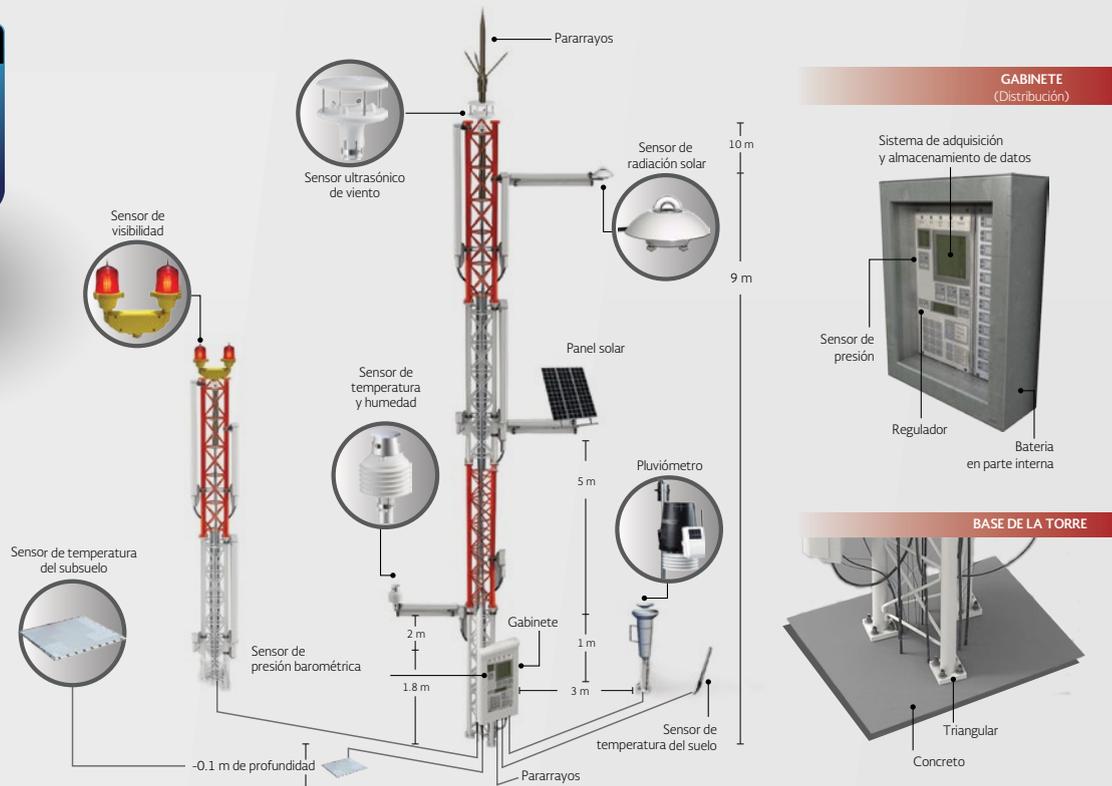
## Ubicación

Las Estaciones Sinópticas Meteorológicas se encuentran ubicadas principalmente en los observatorios meteorológicos.

# RED NACIONAL DE ESTACIONES SINÓPTICAS METEOROLÓGICAS, ESIME'S

## Las estaciones

Las Estaciones Sinópticas Meteorológicas se encuentran ubicadas estratégicamente en la República mexicana.



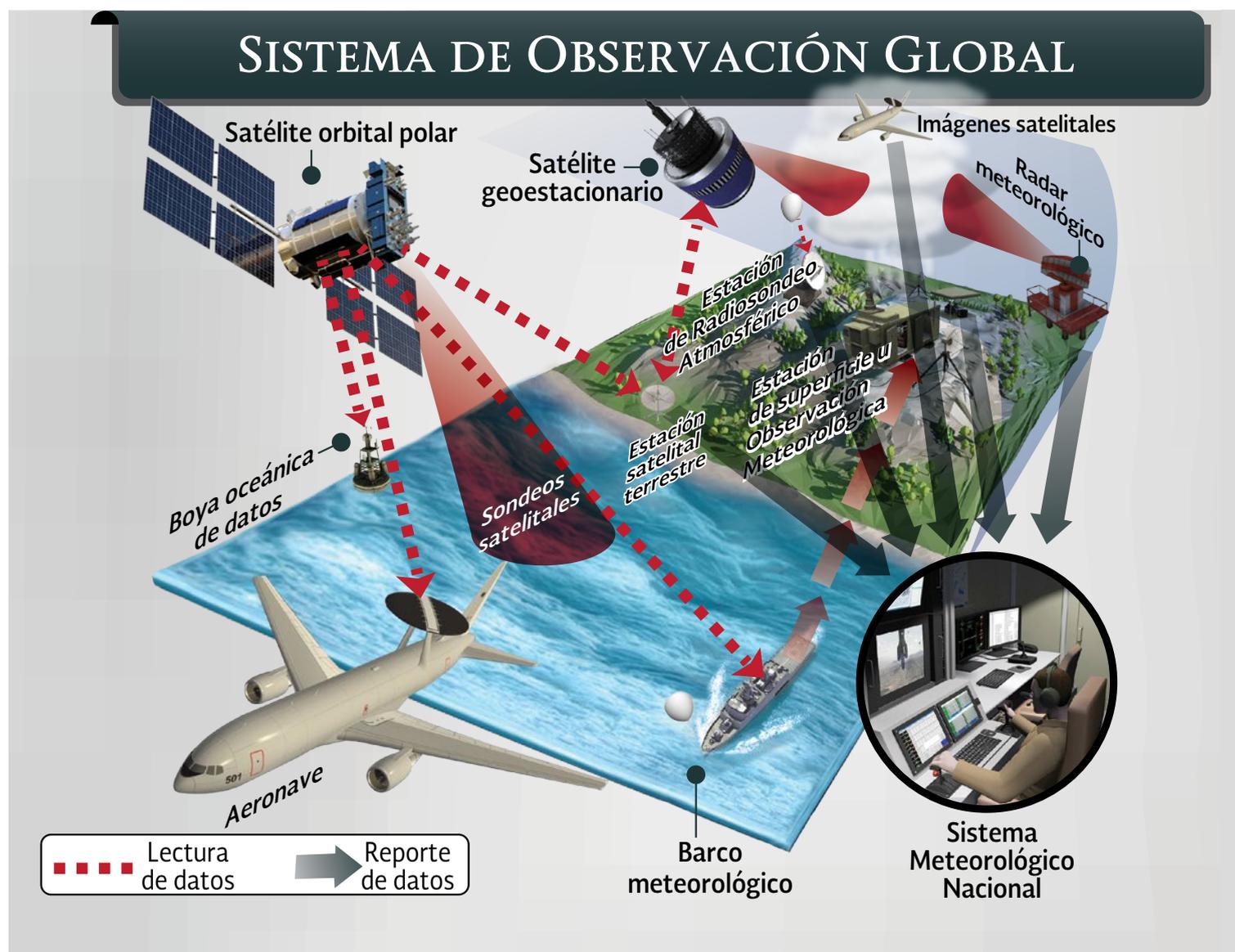
Se les denomina mensajes sinópticos porque transmiten sus observaciones y mediciones en tiempo real, en horas establecidas a nivel mundial (00, 03, 06, 09, 12, 15, 18 y 21 horas Tiempo Universal Coordinado [TUC]), para lograr una visión de conjunto de la atmósfera del planeta.

La ESIME cuenta con sensores que miden:

1. Temperatura
2. Humedad
3. Dirección y velocidad del viento
4. Presión atmosférica
5. Precipitación
6. Radiación solar
7. Temperatura a 10 cm sobre la superficie
8. Temperatura a 10 cm de profundidad del suelo

9. Visibilidad
10. Parámetros calculados:
  - a) Presión reducida al nivel del mar
  - b) Todos los cálculos de medias, acumulados, extremos y de diferencias y tendencias para el mensaje sinóptico
11. Evapotranspiración
12. Insolación

La información que se recibe de las Estaciones Sinópticas Meteorológicas es de vital importancia porque los datos son utilizados para la formulación de la predicción meteorológica del Servicio Meteorológico Nacional, y es difundida a través de boletines y avisos. Uno de los productos más útiles para el pronóstico meteorológico es la carta sinóptica meteorológica.



El Meteorológico Nacional cuenta con una red de observación de 98 ESIMES, ubicadas en 77 observatorios meteorológicos de la Red Nacional del SMN y en 21 sitios estratégicos distribuidos en la República Mexicana.

### Red de Radares Meteorológicos

Un radar es un sistema de emisión, recepción y procesamiento de señales que emplea equipos mecánicos, eléctricos y electrónicos.

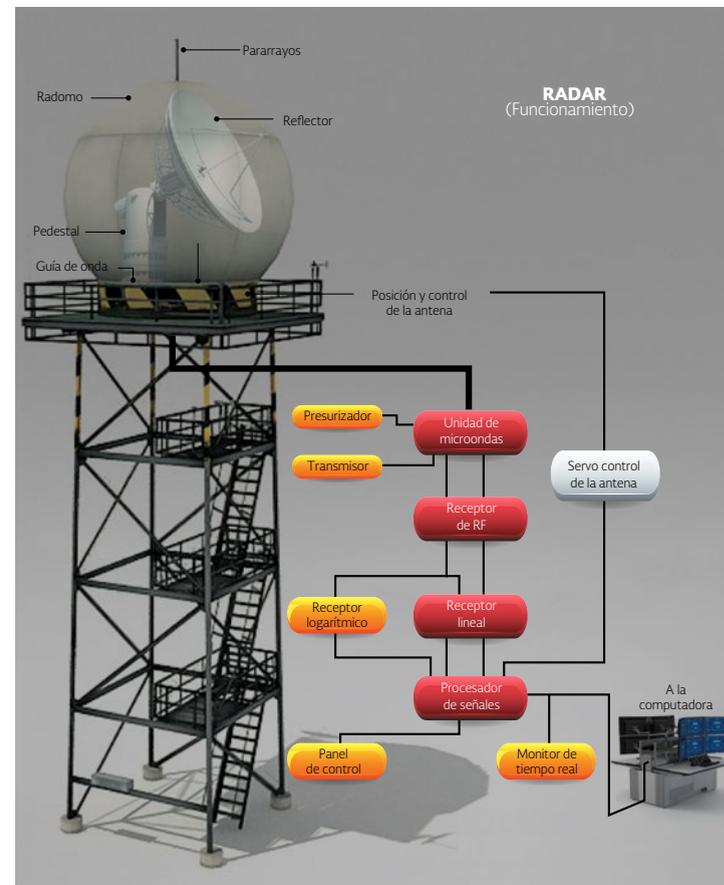
La transmisión de pulsos de radiofrecuencia incide en un “blanco”, que refleja la señal en varias direcciones, mientras una pequeña porción de retorno (eco) es captada por la misma antena hacia el receptor para filtrarla y eliminar el clutter (ruido), amplificarla y procesarla.

Al medir el tiempo entre la señal transmitida y la recibida, así como la posición de la antena —en elevación y azimut— se puede determinar la posición exacta del “blanco”, es decir, la lluvia, la nieve o el granizo.

El uso de la doble polaridad de la señal y su nivel de intensidad, así como del efecto Doppler, proporcionan un mayor



ESIME.



Radar.

conocimiento de la reflectividad y, por tanto, de los fenómenos observados.

El radar meteorológico se emplea para la medición y seguimiento de fenómenos atmosféricos como lluvia, granizo y nieve, principalmente. La información que maneja es equivalente al empleo de cientos de pluviómetros transmitiendo en tiempo real, con el plus de que posibilita la realización de estudios de volumen de partículas de agua en nubes, diferentes cortes o secciones, imágenes en tercera dimensión, así como el seguimiento y estudio de fenómenos severos como tormentas y huracanes.

### ESTACIONES DE RADAR METEOROLÓGICO

El Servicio Meteorológico Nacional actualmente cuenta con una red de 13 radares meteorológicos para vigilar el desarrollo de fenómenos atmosféricos de tipo hidrometeorológico, hasta en un rango de 350 km a la redonda por cada estación. Esta red está formada por cuatro equipos Enterprise, cinco Ericsson-Sigmat, dos Enterprise-Sigmat, un Vaisala y otro Gematronik.

Adquiridos por la extinta Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, los primeros cinco radares Enterprise Electronics Corporation (EEC) que se instalaron en México eran analógicos: cuatro fijos y un móvil, y su operación e instalación se realizó durante la segunda mitad de la década de los años 70 del siglo XX, de la siguiente manera:

1. Radar fijo en Tampico, Tamaulipas. Inició operaciones en diciembre de 1975 y en 2008 fue reubicado en Altamira.
2. Radar móvil. Inició operaciones en 1976 y fue utilizado en múltiples regiones del país, destacándose Sonora y Baja California Sur, para convertirse en fijo a finales de 1994, en Cabo San Lucas.
3. Radar fijo de Guasave, Sinaloa. Inició operaciones en 1979 y continúa operando.
4. Radar fijo de El Palmito, Durango. Se instaló originalmente en 1980, pero por problemas operativos fue trasladado a una plataforma de PEMEX en Cayo Arcas, Campeche. En 1993 se actualizó y reinstaló en Acapulco, Guerrero.

5. Radar fijo de Cerro Catedral, Estado de México. Instalado por el personal del SMN a finales de los 80. En 1993 fue reubicado en El Palmito, Durango.

Estos radares operaban con consolas analógicas, que realizaban barridos básicos como el Plan Position Indicator (PPI) y el Range High Indicator (RHI). Disponían del sistema Digital Video Integrator Processor (DVIP), que permitía ver la intensidad de los ecos (lluvias, tormentas y huracanes) en seis niveles de gris. Dichas imágenes se recolectaban cada media hora y eran dibujadas sobre la pantalla de vidrio de la consola del radar, para posteriormente calcarlos en plantillas con el mapa de la zona y transmitirlos bajo Codificación de Información de Radar (código CODIR) por radio o teléfono y, posteriormente, por facsímil o fax. La transmisión de datos de radar y comunicación de voz se realizaba por enlaces satelitales.

Entre 1993 y 1994 se adquirieron siete radares Ericsson que fueron instalados en Cerro Catedral, Estado de México; Cuyutlán, Colima; Alvarado, Veracruz; Puerto Ángel, Oaxaca; Ciudad Obregón, Sonora; Sabancuy, Campeche, y Cancún, Quintana Roo.

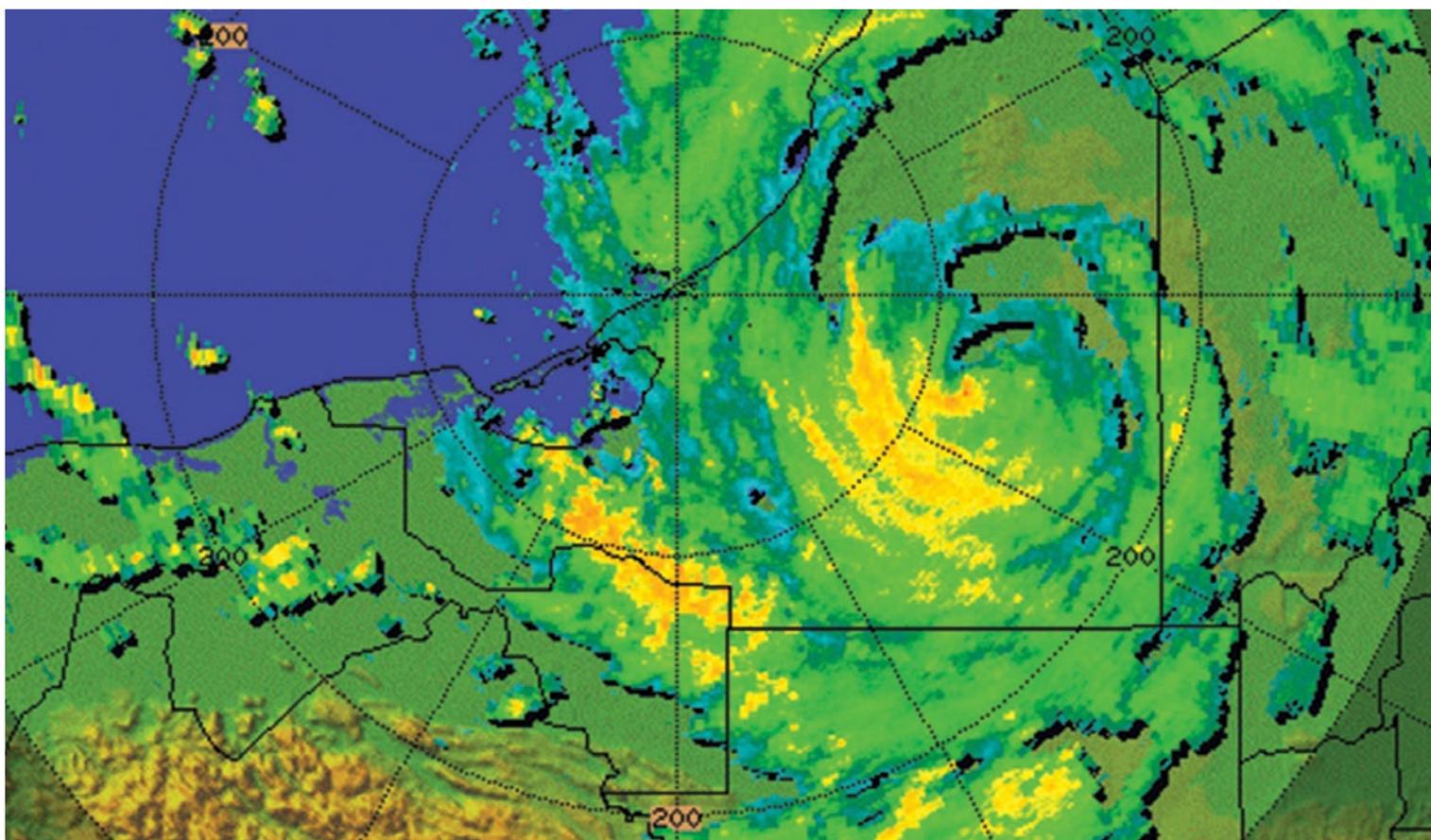


Imagen del Radar de Sabancuy, Campeche



Antena de radar.

A finales del año 2000, los equipos de Cancún y Sabancuy fueron modificados tecnológicamente para convertirse en Enterprise-Ericsson. Además se rehabilitó la Red de Radares Meteorológicos. En 2002 se dio mantenimiento a los cinco radares Ericsson y en 2003 a los siete restantes Enterprise. En 2005 y gracias al apoyo del Fondo para la Prevención de Desastres Naturales (FOPREDEN) se compró un lote de refacciones para cuatro de los radares EEC.

A finales de 2007 se actualizaron los cinco radares Ericsson con tecnología Siment, y se puso en operaciones un decimotercer radar, de última tecnología, ubicado en el Cerro Mozotal, en Chiapas, con una participación de 50% FOPREDEN y 50% CONAGUA. Este radar es de doble polaridad y de última tecnología.

En diciembre de 2009 se actualizaron los sistemas de transmisión, recepción, procesamiento, equipos de cómputo y software de los radares de Altamira y Cancún. Y en 2010 los de Acapulco, Guasave y Sabancuy, concluyendo los trabajos de estos dos últimos en 2011. Sin embargo, debido a los daños que sufrió el radar de Acapulco por el paso del



Radar de Mozotal, Chiapas

ciclón tropical Manuel, en 2013, fue sustituido en 2014 por un nuevo equipo banda C, EEC.

### Red de observatorios meteorológicos sinópticos (ROMS)

Esta red está formada por 79 observatorios, distribuidos de manera estratégica en el territorio mexicano. Tienen como funciones la observación, la medición, el registro y la transmisión de las condiciones atmosféricas durante las 24 horas.

Se denomina sinóptico porque transmite sus observaciones y mediciones, de manera simultánea, en horas establecidas a nivel mundial (00, 03, 06, 09, 12, 15, 18 y 21 horas Tiempo Universal Coordinado), para lograr una visión de conjunto de la atmósfera del planeta.

### EL OBSERVADOR EN TURNO

1. Examina y registra las variables sensoriales, como cantidad (en octas), altura y tipo de nubes; la visibilidad y el tiempo presente y pasado.
2. Auxiliándose del instrumental de medición toma las lecturas de éstos y registra la dirección y velocidad del viento, las temperaturas, la humedad, la presión atmosférica, las horas de Sol/Radiación Solar, la precipitación y la evaporación.

Esos datos horarios son almacenados, para dar seguimiento al comportamiento de la atmósfera, y a su vez, ir formando la climatología del lugar donde se encuentra operando un observatorio.

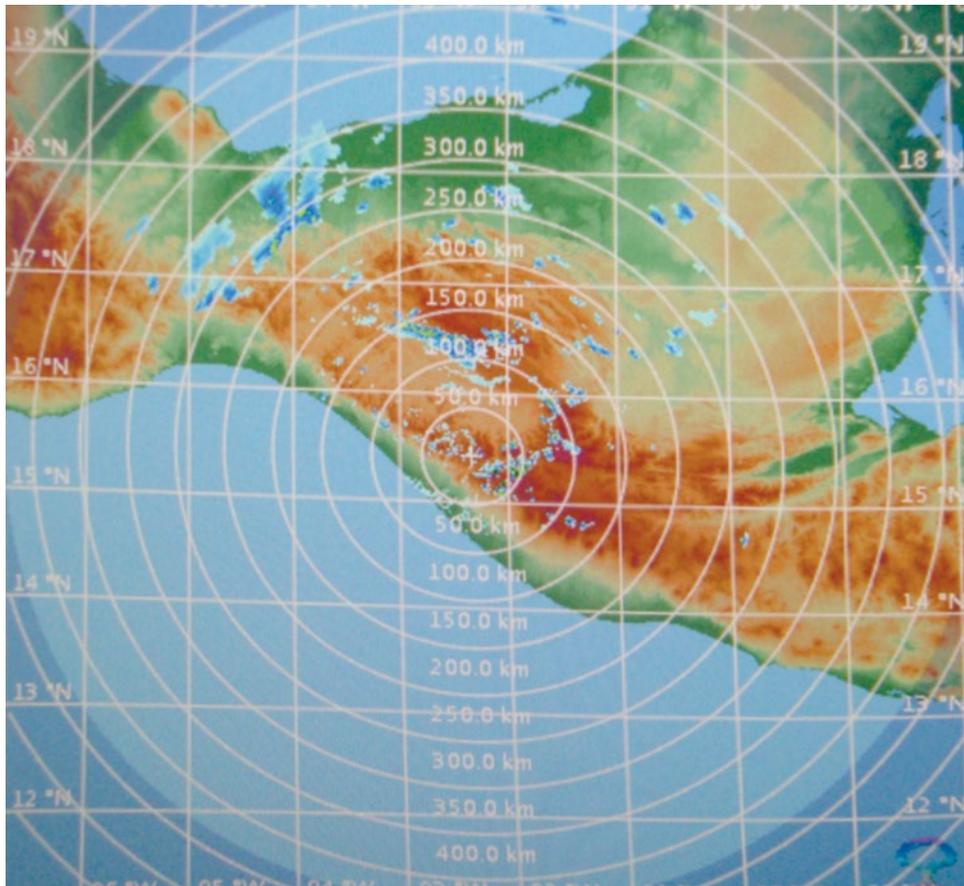
Tabla de instrumentos utilizados en la medición de las variables meteorológicas

Instrumento	Variable a medir
Anemocinógrafo, anemómetro ultrasónico	Dirección y velocidad del viento
Termómetros digitales o convencionales	Temperatura
Higrómetro y/o psicrómetro	Humedad relativa
Barómetro digital y/o barómetro aneroide	Presión atmosférica
Pluviómetro y pluviógrafo	Precipitación
Heliógrafo y piranómetro	Radiación solar
Evaporímetro	Evaporación

Las observaciones realizadas cada tres horas (00, 03, 06, 09, 12, 15, 18 y 21), con apoyo de los datos horarios previamente obtenidos, sirven de base para generar el mensaje



Heliógrafo.



Observaciones meteorológicas.

sinóptico o resumen de los datos observados y medidos, de manera cifrada en el código synop. El mensaje es enviado a las instalaciones del SMN por todos los observatorios de la red, para ser transmitido al Centro Meteorológico Mundial de Washington y a la vez compartido por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), ubicada en Washington, DC. Con esta acción, México cumple con el compromiso internacional de intercambio de información meteorológica, como miembro de la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

El primer Observatorio Meteorológico inició operaciones el 6 de marzo de 1877, en la Ciudad de México. A partir de ese momento y hasta la fecha, los Observatorios Meteorológicos han permitido que su información sea utilizada para la construcción de presas, infraestructura carretera, edificaciones urbanas, cálculo de tarifas eléctricas, etcétera; así como para el análisis y la elaboración de pronósticos del tiempo, estudios hidrológicos, climatológicos, agrometeorológicos, entre otros. Productos que apoyan en la toma de decisiones en los sectores de protección civil, administración del agua, agricultura, forestal, medio ambiente y salud.

Dada la importancia de la Red de Observatorios, en el SMN se tiene programado:

1. Establecer un total de cien observatorios
2. La reubicación de observatorios inmersos en la mancha urbana
3. El remplazo y modernización del instrumental de medición

### Red de estaciones de radiosondeo atmosférico

Consta de 15 estaciones de radiosondeo, con tecnología de punta, que permite efectuar lanzamientos de radiosondeo atmosférico para cubrir las necesidades operacionales en tiempo real para el análisis y el pronóstico meteorológico.

Como parte de la OMM, México provee de información sobre sus observaciones meteorológicas a los otros miembros que, a su vez, retroalimentan al país, manteniendo así las bases de cooperación internacional que en su conjunto forman el Sistema Global de Observación del Clima de la Red de Vigilancia Meteorológica Mundial.

Los programas de radiosondeos de los miembros de la Organización Meteorológica Mundial proveen bases de datos nacionales e internacionales de observaciones en altura para investigación y propósitos climatológicos.



Lanzamiento de radiosonda.

## Radiosondeo

Un radiosondeo es la medición de parámetros meteorológicos en la atmósfera superior, que va de la superficie hasta aproximadamente 25 km de altura. Estos son:

1. Presión atmosférica en hectopascales
2. Temperatura del aire en grados Celsius
3. Humedad relativa en porcentaje (%)
4. Velocidad del viento en metros por segundo
5. Dirección del viento en grados

La medición se realiza empleando un dispositivo llamado radiosonda –que tiene sensores miniatura y un receptor GPS protegido en un cuerpo de unicel, con peso menor a 93 gramos– que asciende a través de un globo meteorológico lleno con aproximadamente 1.5 m<sup>3</sup> de helio o hidrógeno <sup>5</sup>.

Los datos son enviados por la radiosonda cada cinco segundos a través de una señal de radiofrecuencia, entre las bandas 400 y 406 MHz, a una estación en tierra que recibe, decodifica y procesa la señal para obtener:

1. El despliegue de todos los datos en tiempo real (alfanuméricos) en intervalos seleccionables por el usuario.
2. El despliegue gráfico de la información durante el ascenso: diagramas termodinámicos y trayectoria del globo.
3. La generación y transmisión de mensajes oficiales de la OMM (formatos TEMP y BUFR).
4. El almacenamiento de los datos de todo el vuelo en formatos ASCII y Excel.

La información generada por los radiosondeos es colectada por el National Center for Environmental Prediction (NCEP) y usada por meteorólogos de toda la Región IV de la OMM (Canadá, EUA, México, Colombia, Venezuela, América del Norte, América Central y el Caribe) para realizar su pronóstico del tiempo.

En México se programan dos radiosondeos diarios en cada estación y ante la cercanía de eventos meteorológicos severos (tormentas, huracanes, entre otros) llegan a realizarse hasta tres lanzamientos en las estaciones de las áreas afectadas o en riesgo. En la Ciudad de México se ha implementado una observación en horario oficial intermedio (18:00 TUC) durante la temporada de lluvias (mayo a octubre) para proveer mayor cantidad de datos en la elaboración del pronóstico meteorológico y los avisos cruciales.

<sup>5</sup> El SMN generalmente emplea generadores de hidrógeno para obtener el gas necesario para las observaciones. Estos equipos descomponen el agua en hidrógeno y oxígeno, mediante corriente eléctrica, de una forma segura y económica.

Los radiosondeos permiten conocer la estructura vertical y horizontal de la atmósfera, sobre todo en la tropósfera, la capa en donde suceden la mayoría de los procesos meteorológicos, ubicada en la parte inferior de la atmósfera, que se extiende desde la superficie terrestre hasta unos 9 km de altura en los polos y a unos 17 km en el ecuador.

Los radiosondeos son el único medio que permite conocer en forma directa las condiciones imperantes en la atmósfera superior, por ello su información (la medición de temperatura y humedad relativa, principalmente) sirve para inicializar los modelos numéricos<sup>6</sup> de análisis y pronóstico meteorológico internacionalmente.

### Productos generados

El Diagrama Termodinámico (DT) es la gráfica que representa el comportamiento vertical termodinámico de una porción de atmósfera definida por tres variables: presión, temperatura y humedad (proporcionados por la radiosonda).

Cada línea del diagrama representa cientos de soluciones para una determinada ecuación. Se emplean esencialmente como una herramienta para predecir el tiempo severo a través de técnicas gráficas.

Existen diferentes tipos de DT: Skew-t, Stuve, Tephigram y Eneagrama, que se diferencian por el tipo de proceso energético que describen, ya sea adiabático o pseudoadiabático, por la descripción de las isobaras, isotermas y demás isolíneas en el gráfico.

Con este diagrama es posible identificar las inversiones térmicas, así como el perfil del viento sobre la ciudad donde se hace el radiosondeo, que en cuestiones de contaminación es fundamental para saber en qué capas atmosféricas entra en contacto con los contaminantes, por ejemplo:

A través de este diagrama se determina la humedad existente en las distintas capas de la tropósfera. Si hay mucha, probablemente se forme nubosidad y con ello la intercepción de la radiación solar, lo que limitará la reacción fotoquímica de los contaminantes precursores del ozono.

El Diagrama Termodinámico ayuda a determinar y cuantificar:

<sup>6</sup> Un modelo numérico es un programa computacional que se basa en las ecuaciones físico-matemáticas que representan el comportamiento de la atmósfera terrestre. Con el resultado del modelo numérico se puede obtener la información de cómo se comportarán los sistemas atmosféricos dentro de 3, 6, 12, 24 o más horas.



Radiosondeo.

1. Estabilidad atmosférica (índices de estabilidad: KI, SI, LI, TT)
2. Energía Potencial Disponible para Convección (CAPE)
3. Viento máximo
4. Capas de nubes
5. Altura de la tropopausa
6. Temperatura del tope de las nubes
7. Zonas frontales
8. Cortante vertical de viento
9. Ubicación de inversiones térmicas
10. Tipos de precipitación
11. Altura del nivel de congelamiento

### Estaciones receptoras de imágenes de satélites meteorológicos (Eris)

El Servicio Meteorológico Nacional cuenta con nueve estaciones receptoras terrenas que le permiten obtener imágenes

de los satélites meteorológicos Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) y Polar Operational Environmental Satellite (POES), de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), de Estados Unidos de América. Seis son estaciones de recepción del satélite geostacionario GOES-Este, dos del satélite geostacionario GOES-Oeste y una de los satélites meteorológicos de órbita polar.

### Esquema para la recepción de imágenes de satélite GOES y POES en el SMN

Los satélites geostacionarios (GOES) se encuentran a una altura aproximada de 36 mil kilómetros, y acompañan el movimiento de rotación de la Tierra. Los GOES-ESTE, en una posición de 0° latitud y -75° longitud oeste, monitorean el Océano Atlántico, y los GOES-OESTE, en una



Observaciones satelitales.

posición de 0° latitud y -135° longitud oeste, monitorean el Pacífico. Las imágenes de escala nacional que se obtienen de estos satélites llegan cada 15 minutos, a través de cinco bandas de operación:

Monitoreo de bandas

Banda	Longitud de onda (μm)	Descripción	Resolución (km)
1	0.55-0.75	Visible	1.0
2	3.80-4.00	Infrarrojo cercano	4.0
3	6.80-7.30	Vapor de agua	4.0
4	10.20-11.20	Infrarrojo	4.0
6*	12.80-13.80	Infrarrojo	4.0

\*Nota: La banda 5 fue sustituida por la 6 por cuestiones de operación de los satélites administrados por la NOAA.

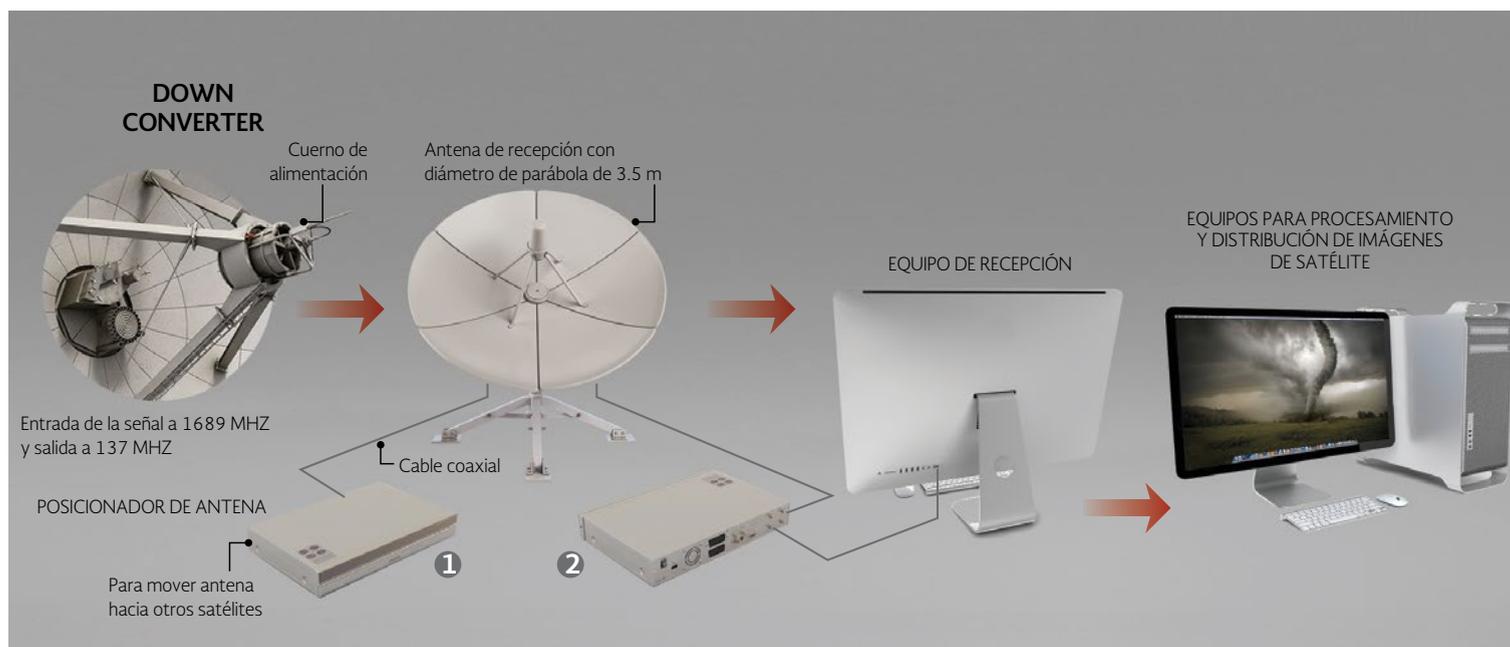
Los satélites polares (POES) orbitan de polo a polo de la Tierra, se ubican a una altura aproximada de 833 km, pasan por una región dos veces al día de forma ascendente y descendente. El sensor de imágenes es llamado Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) y tiene seis bandas:

Banda	Longitud de onda (μm)	Descripción	Resolución (km)
1	0.58-0.68	Visible	1.0
2	0.725-1.1	Infrarrojo cercano	1.0
3A	1.58-1.64	Infrarrojo	1.0
3B	3.55-3.93	Infrarrojo	1.0
4	10.20-11.20	Infrarrojo	1.0
5	12.80-13.80	Infrarrojo	1.0

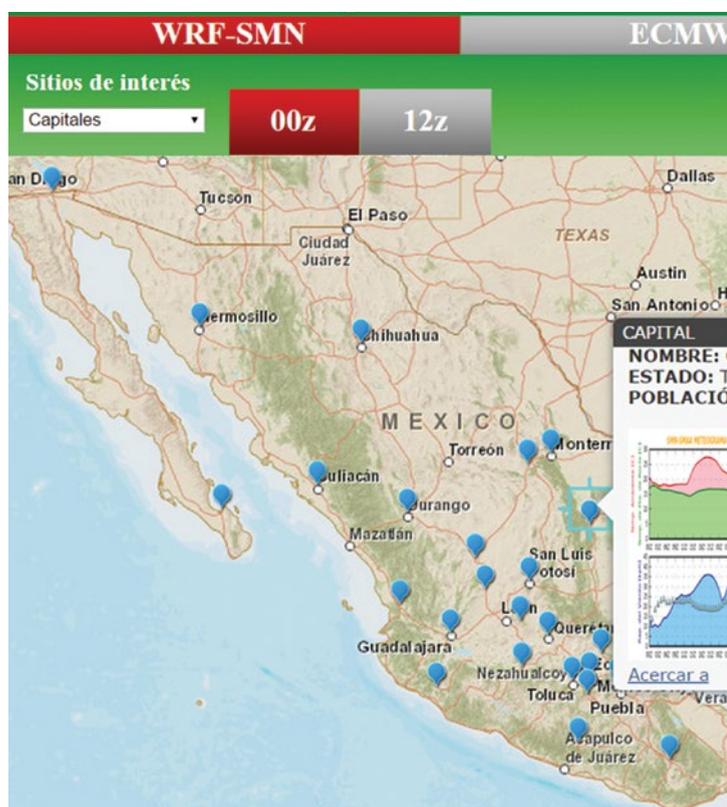
Las imágenes de satélites meteorológicos GOES y POES recibidas en el SMN, junto con otras fuentes de información, son utilizadas por meteorólogos y previsores del tiempo para elaborar boletines que se distribuyen a diversas instituciones, empresas privadas y a los medios masivos de comunicación. Además estas imágenes son indispensables para elaborar pronósticos más precisos ante la presencia y evolución de fenómenos meteorológicos que pongan en riesgo la vida humana así como sus bienes.

Modelos Numéricos para el Pronóstico del Tiempo

El Servicio Meteorológico Nacional, desde finales de la década de los 80 del siglo XX, ha incursionado en los Modelos Numéricos, uno de los arquetipos imprescindibles para el pronóstico del tiempo moderno. Entonces se adquirieron dos equipos de supercomputadoras, que corrían bajo el modelo Baroclónico



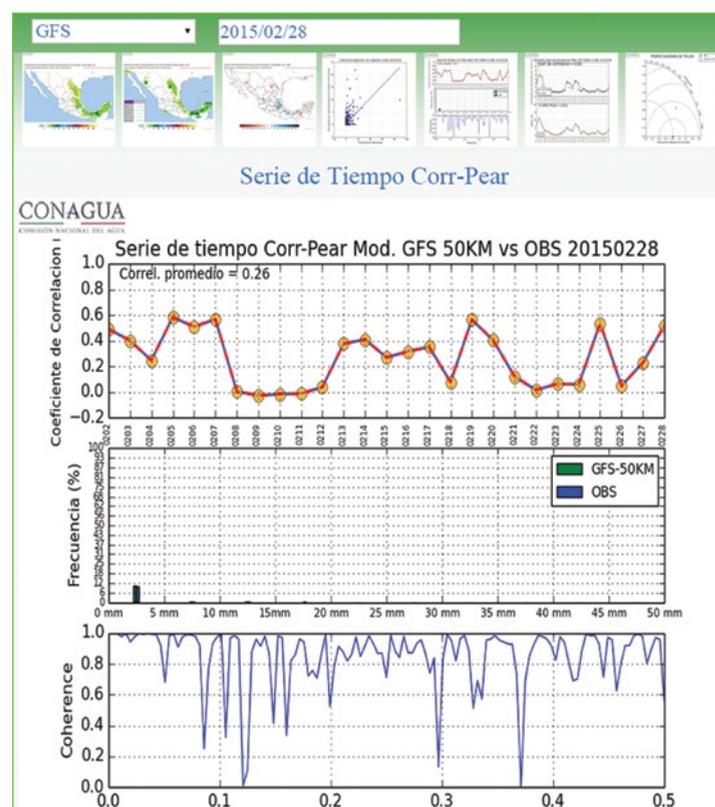
Esquema de recepción de imágenes de satélite.



Meteorogramas SMN-WRF.

de tres niveles en la vertical, autoría del científico mexicano Julián Adem. El modelo era fundamental para el pronóstico del tiempo a corto plazo, es decir, de 12, 24 y 48 horas. Estos equipos dejaron de funcionar alrededor de 1995, por lo que el SMN optó por la descarga de información y visualización del Modelo de Aviación de Estados Unidos de América (AVN, por sus siglas en inglés). Y hoy en día la CGSMN sigue elaborando dichas cartas con el modelo Global Forecasting System (GFS por sus siglas en inglés).

En 1997, personal de la CGSMN fue capacitado en el Centro Nacional de Tormentas Severas (NSSL, por sus siglas en inglés), del Servicio Meteorológico Nacional de Estados Unidos de América, bajo el modelo a Mesoescala Generación 5 (MM5). En 1999 se adquiere una supercomputadora, de ocho procesadores y 13 discos duros para el respaldo de información en gigabytes. Con este equipo se logró procesar dos veces el modelo MM5, predecesor del Weather Research and Forecasting (WRF). Las salidas son cada seis horas con pronóstico de 72 horas, es decir, tres días, y para estudios especiales se pueden reprogramar cada hora. La importancia de los productos numéricos radica en que sirven de ayuda para realizar los avisos de pronóstico meteorológico.



Verificación objetiva de modelos numéricos.

Debido a los costos de la primera supercomputadora y el crecimiento de procesadores de alto rendimiento, en 2005 se da una nueva y exitosa configuración a los equipos de supercomputo tipo Clúster, y se adquieren dos más entre 2006 y 2007 para sustituir a la supercomputadora.

En el Clúster de 25 procesadores se graficaba la información del modelo Global Forecast System (GFS) para su visualización, que dicho sea de paso son los datos de entrada para los modelos a mesoescala (MM5 y WRF).

Actualmente se corre el modelo WRF, con resoluciones de 16 km y anidamientos de 8 y 4 km a 35 niveles en la vertical. El anidamiento ayuda a realizar estudios, monitoreo y pronósticos muy puntuales.

Los convenios que se tienen con otros países permiten al SMN contar con los datos del European Centre for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF), un modelo europeo a escala global de alta resolución: 12 km en la horizontal y 91 niveles en la vertical que —junto con el Rapid Precision Model (RPM), proporcionado por el Weather Services International (WSI), y con una resolución de 12 km en la horizontal; el modelo GFS de resolución de 50 km y 64 niveles en la vertical—, permite visualizar fenómenos globales como la



Servidor de mapas - SMN.

trayectoria de huracanes, tormentas severas, los efectos de *El Niño* y *La Niña*, etcétera.

Cabe destacar que el CGSMN ha colaborado con una serie de instituciones internacionales como: National Center for Atmospheric Research (NCAR), National Severe Storms Laboratory (NSSL), University Corporation for Atmospheric Research (UCAR) y la Agencia Española de Meteorología (AEMET) para el mantenimiento, la asesoría y la colaboración de la modelación mesoescalar y sus aplicaciones en otras ramas de la meteorología, como imágenes de satélite, radar meteorológico entre otras.

En el ámbito nacional se trabaja y se proveen datos numéricos con instituciones como el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM (CCA), el Laboratorio de Geodinámica Computacional (LGC), el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) y el Sistema de Alerta Fitosanitaria del Estado de Guanajuato (SIAFEG), por citar solo algunas instancias educativas y gubernamentales.

También se ha incursionado en Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la difusión de contenido meteorológico a través de Web Map Services.

La CGSMN actualmente cuenta con un esquema de verificación objetiva de modelos numéricos, que utiliza

metodologías y métricas recomendadas por la OMM. Teniendo como objetivo comprobar la fiabilidad de los modelos numéricos se comenzó a trabajar con los esquemas de asimilación y control de calidad de datos, los cuales buscan contribuir con la mejora de modelos de predicción.

La manipulación y visualización de todos estos productos se apoya en las herramientas informáticas: Metview, McIDAS, GrADS, WINGRIDDS y NCL; así como en lenguajes de programación: SHELL, PYTHON, C, FORTRAN, HTML, JavaScript, entre otros, bajo el sistema operativo LINUX.

El sistema de predicción numérica determinístico consta de un solo modelo numérico y su resultado, que permite el pronóstico del tiempo durante las primeras horas en que se presenta un fenómeno y hasta por tres días. Sin embargo, debe considerarse que, conforme avanzan las horas, el pronóstico se vuelve incierto debido a que la atmósfera posee un componente caótico. Para minimizar esta imprecisión se utiliza el sistema de pronóstico por ensambles que, perturbando algunas variables meteorológicas y sus parametrizaciones, reduce considerablemente la incertidumbre y logra pronósticos más acertados por un margen de tiempo mayor.

El SMN ha incursionado con estos sistemas y estrategias en colaboración con instituciones como el CMC de Canadá,



Volcán Popocatepetl.

el NCEP-NOAA, el FNMOC, entre otras. En 2004 México, Estados Unidos y Canadá firmaron un acuerdo para lanzar el Sistema Norteamericano de Pronóstico por Ensamblés (NAEFS, por sus siglas en inglés), que permita mejorar las predicciones diarias operativas en un periodo de 1 a 16 días.

Actualmente las salidas de NAEFS se utilizan en el Centro Nacional de Previsión del Tiempo del SMN.

Cabe mencionar que NAEFS forma parte de la Alianza de Servicios Climáticos de Norteamérica (NACSP, por sus siglas en inglés), lo que le permite al SMN obtener información precisa y oportuna del tiempo y clima en México, y de toda la región norteamericana.

### Proyecto de intercambio de información (radio-XBA)

El manejo del Centro Nacional de Telecomunicaciones Meteorológicas (CNTM), conocido como Radio-XBA, es responsabilidad de la jefatura de Proyecto de Intercambio de Información.

El CNTM se encarga de la recolección de la información generada por la red de observatorios meteorológicos de México, misma que está integrada por 79 observatorios meteorológicos convencionales y 189 Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA's).

La información de los puntos de observación es recopilada cada tres horas para su envío al Centro Meteorológico Mundial de Washington (CMMW), a través de un sistema de telecomunicaciones denominado MESSIR-WAFS. Y de ahí se distribuye mundialmente a través del Global Telecommunication Center (GTS), así como a los usuarios nacionales.

La información se utiliza para la elaboración de pronósticos del tiempo, estudios hidrológicos, climatológicos y agrometeorológicos, por las distintas áreas de la Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional (CGSMN) y de otras dependencias como es el Servicio a la Navegación del Espacio Aéreo Mexicano (SENEAM), la Fuerza Aérea Mexicana (FAM), la Secretaría de Marina (SEMAR) y muchas otras.

The screenshot shows the official website of the National Meteorological Service (SMN) of Mexico. At the top, the logo for CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) and the website URL smn.conagua.gob.mx are visible. A search bar is located in the top right corner. Below the header, there is a navigation menu with links for 'Inicio', 'Acercas del SMN', 'Ciclones Tropicales', 'Climatología', and 'Observando el Tiempo'. A prominent red banner at the top of the main content area reads 'AVISO METEOROLÓGICO: ORTE DEL TERRITORIO NACIONAL EN LAS PRÓXIMAS TRES HORAS...'. Below this, there are two buttons: 'Aviso de Tiempo Severo' and 'Aviso de Norte'. A central map of Mexico displays 'Condiciones Actuales' (Current Conditions) with temperature readings for various cities. To the right of the map, there are several service links: 'Consulte el Pronóstico del Tiempo', 'Portal Interactivo Hidrometeorológico', 'Imágenes de Satélite', 'Meteogramas', and 'Imagen Interpretada'. At the bottom, there are three columns: 'NOTICIAS RECIENTES' (Recent News) with a list of weather-related news items, 'PRONÓSTICOS' (Forecasts) with icons for different forecast types, and 'VIDEO PRONÓSTICO DEL TIEMPO' (Weather Forecast Video) with a thumbnail image.

El portal del SMN mantiene una actualización constante y diaria de los fenómenos meteorológicos.

### Boletines, avisos meteorológicos, comunicados y avisos meteorológicos de prensa y entrevistas

Para informar a la población y a las autoridades sobre los riesgos potenciales que pueden ser provocados por fenómenos meteorológicos, el SMN elabora y difunde boletines y avisos que le ayudan a cumplir con esta misión.

Estos materiales informativos buscan avisar en tiempo y forma sobre los efectos que pueden producirse, previendo la evolución de los fenómenos meteorológicos y su localización en el futuro inmediato, para así tomar las decisiones personales y gubernamentales que permitan evitar o mitigar los efectos negativos ante condiciones adversas como lluvias tormentosas, granizo, descargas eléctricas, vientos fuertes o inclusive tornados.

Los boletines y avisos son elaborados por personal altamente calificado que analiza e interpreta diversas fuentes de información terrestre, de altura y de sensores remotos, como datos de observatorios meteorológicos, estaciones automáticas, imágenes de satélite, radar, globos sonda, aviones cazahuracanes; así como modelos numéricos de pronóstico, etcétera.

Además, los pronósticos del SMN también se publican en su página de Internet, donde se resaltan las condiciones atmosféricas actuales y lo que se espera para las próximas horas.

El área de Comunicación Social juega un papel fundamental dentro del SMN, ya que es el vínculo que proporciona información oportuna a los medios de comunicación quienes a su vez la transmiten a la población que podría estar en riesgo por algún fenómeno meteorológico.

Comunicación social emite dos comunicados diarios con el pronóstico del tiempo; y cuando hay condiciones de tiempo severo se realizan avisos meteorológicos cada tres horas las 24 horas los 365 días del año, incluso puede ser cada hora cuando un ciclón tropical se encuentre próximo a impactar en territorio nacional. También emite comunicados de prensa especializados en temas relacionados de meteorología y climatología y de tópicos de divulgación.

Además esta área es el vínculo que acerca a los periodistas con los especialistas del SMN; diariamente se recibe a los representantes de diversos medios de comunicación

para entrevistas sobre las condiciones del estado del tiempo y otros temas de climatología.

### Capital humano

Sin duda una pieza fundamental del Servicio Meteorológico Nacional es su capital humano. Su profesionalismo y experiencia son una muestra del compromiso asumido ante la sociedad.

Para cumplir sus objetivos, el SMN cuenta con las gerencias de Meteorología y Climatología, y de Redes de Observación y Telemática.

La primera está integrada por las subgerencias de Pronóstico Meteorológico, Pronóstico a Mediano y Largo Plazo, y de Monitoreo Atmosférico Ambiental, además de la coordinación de los Centros Hidrometeorológicos Regionales.

Estas áreas se encargan de la vigilancia permanente de la atmósfera para identificar los fenómenos meteorológi-

cos que amenacen la integridad física y el patrimonio de los mexicanos. De sus observaciones se desprenden pronósticos del tiempo a corto y mediano plazo, modelos numéricos, y otros insumos para instituciones gubernamentales, universidades, centros de investigación, organismos privados y para la población en general.

La Gerencia de Redes de Observación y Telemática está conformada por las subgerencias de Redes de Observación y de Informática y Telecomunicaciones.

La Subgerencia de Comunicación y Desarrollo Institucional, adscrita directamente a la Coordinación General del SMN, mantiene informados a los diversos medios de comunicación, además de ser responsable de la emisión de mensajes a través de las redes sociales y la generación de material de divulgación. Así, una plantilla de 140 colaboradores, con licenciatura, maestría y doctorado en Meteo-



La Subgerencia de Comunicación y Desarrollo Institucional mantiene informados a los diversos medios de comunicación.

rología, Ciencias de la Atmósfera, Hidrología, Físico-Matemáticas, Geografía, Comunicación, Agronomía y otras especialidades, son los encargados de generar productos informativos de interés.

El equipo de profesionales del SMN da atención las 24 horas del día, los 365 días del año y en todo momento combina sus conocimientos, habilidades, destrezas y talentos para el servicio del pueblo de México.

### LA METEOROLOGÍA EN EL MUNDO

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) coordina las actividades de los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales al 2015 son 191 estados y territorios. Es un sistema global que brinda la posibilidad de acceder a datos e información en tiempo real o diferido sobre el tiempo, el clima y el agua.

La OMM nació en 1950, en el seno de la Organización de las Naciones Unidas, para relevar a la Organización Meteorológica Internacional (1873). Y es a partir de 1951 que México se convierte en miembro.

Para garantizar sus funciones, la OMM dividió el planeta en seis regiones y México forma parte de la IV, que corresponde a América del Norte, Centroamérica, Venezuela, Colombia y el Caribe.

La OMM se rige por el Consejo Ejecutivo, órgano responsable de coordinar los programas y presupuestos de los países miembros, así como de proveer información técnica, asesoría y apoyo en las diferentes actividades de la organización; y de analizar y formular recomendaciones sobre cualquier asunto que afecte a la meteorología internacional.

El 17 de diciembre de 2012 se designó a Juan Manuel Caballero, maestro en Ciencias, como coordinador general del SMN y representante permanente ante la OMM. En mayo de 2013 fue electo miembro del Consejo Ejecutivo y representante de la Región IV, formando parte de los Comités de Clima, Agua y Medio Ambiente y Entrega de Servicios.

### PROGRAMAS DE VIGILANCIA METEOROLÓGICA GOS

El Programa de Observación Mundial (GOS, por sus siglas en inglés), se encarga de recopilar las observaciones meteorológicas en todo el planeta, las cuales se archivan para consultas e investigaciones. México coopera con el envío de su información meteorológica cada tres horas los 365 días del año.



El equipo de profesionales del SMN da atención las 24 horas del día, los 365 días del año.

### NOAA-SMN

El 3 de octubre de 1970 se creó la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés). Sus orígenes se remontan a 1807, con la primera Agencia Científica de la Nación.

La NOAA además de informar sobre pronósticos meteorológicos diarios, avisos de tormentas severas y vigilancia del clima, estudia y protege el medio ambiente, así como los



NOAA también apoya el estudio y protección de ecosistemas marinos.

recursos marinos. Convirtiéndose así en líder internacional en materia científica y ambiental.

Para estrechar la cooperación en las ciencias del clima y sus aplicaciones, el SMN mantiene una alianza estratégica de cooperación técnica con el Centro de Predicción del Clima (CPC) de la NOAA y con el Instituto Internacional de Investigación del Clima y la Sociedad (IRI) de la Universidad de Columbia.

En 2014, el SMN fue anfitrión del XXXVI Comité de Huracanes de la IV Región Meteorológica de la OMM y, por primera vez, cuatro integrantes del Meteorológico Nacional formaron parte de la tripulación de un avión cazahuracanes NOAA, sobrevolando al huracán *Simon* (Categoría III) del Océano Pacífico Nororiental.

El SMN también forma parte de la Alianza Norteamericana de Servicios Climáticos, en cooperación con los Servicios Meteorológicos de Estados Unidos y Canadá.

Además, la participación de México como miembro del Foro de Cooperación Económica Asia-Pacífico (APEC) en materia de clima, le permite el intercambio de experiencias y colaboración climática con múltiples países que tienen estrecha relación económica con nuestra nación.

En el Marco Mundial para los Servicios Climáticos (MMSC) de la OMM, el SMN promovió la creación del Centro Regional de Servicios Climáticos para Mesoamérica y el Caribe <sup>7</sup>, con el apoyo de la Secretaría de Relaciones Exteriores.

México es de los primeros países de América Latina que forma parte del Aircraft Meteorological Data Relay (AMDAR, por sus siglas en inglés), convenio firmado en 2014 que tiene por objetivo recopilar información meteorológica de 26 aeronaves B737 de vuelos comerciales, que será de gran ayuda para los pronósticos del tiempo.

### Centro Nacional de Huracanes y Tormentas Severas

Los ciclones tropicales son fenómenos atmosféricos de gran impacto en México, debido a que se encuentra entre dos áreas de formación y desarrollo de estos fenómenos: el Océano Atlántico y el Océano Pacífico Nororiental. Los ciclones tropicales se acompañan de vientos fuertes, lluvias, oleaje elevado y marea de tormenta.

<sup>7</sup> Objetivo planteado en la Meta Nacional IV del Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018, "México con Responsabilidad Global".



Los pronósticos ayudan a prevenir y mitigar los daños entre la población.

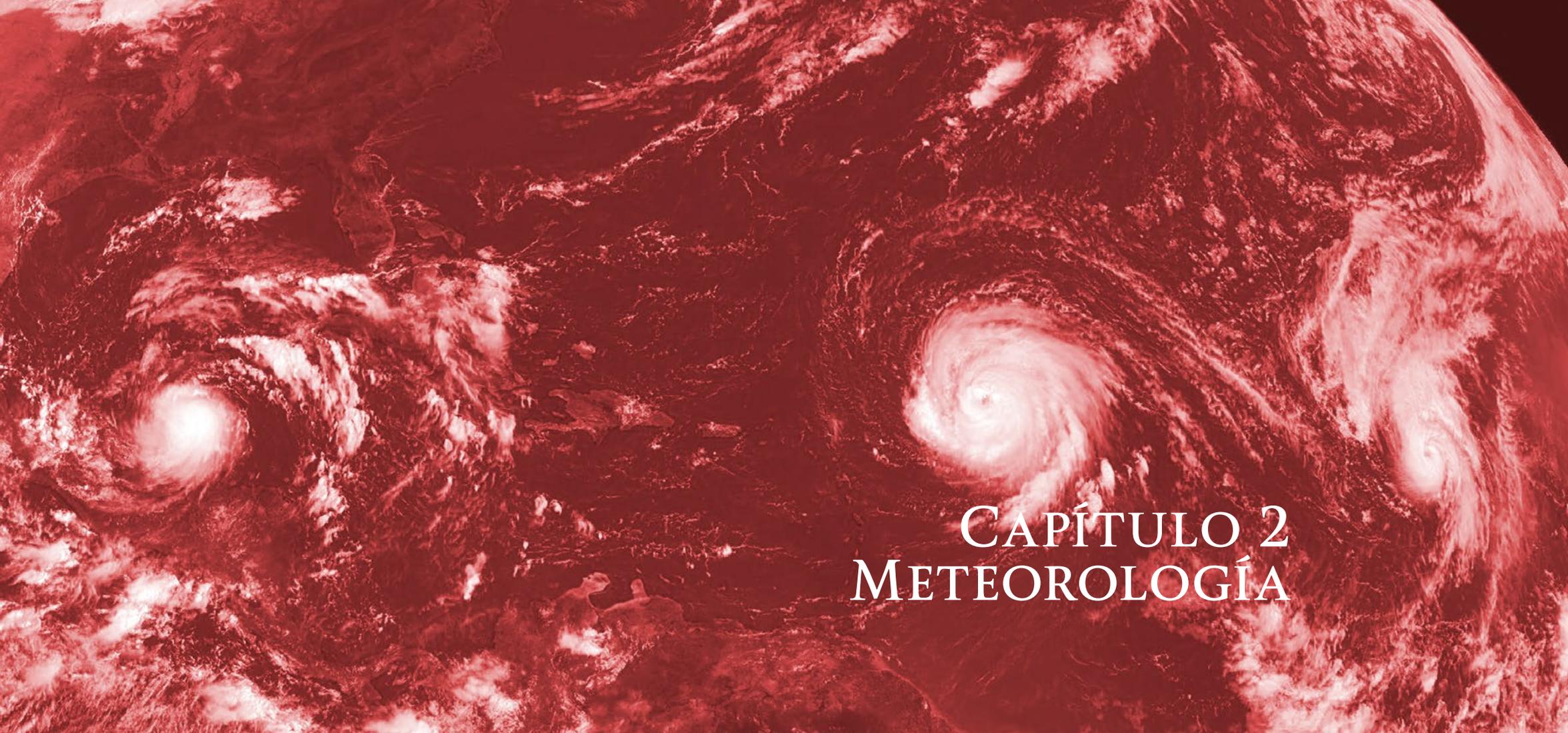
Las tormentas severas son capaces de provocar daños a población, infraestructura y medio ambiente por uno o más de los fenómenos asociados a las mismas, como lluvia, viento, actividad eléctrica y granizo.

De ahí la necesidad de brindar información asociada a ciclones tropicales y tormentas severas, a diferentes escalas espaciales y temporales, al público demandante en cada temporada de lluvias. Para lograrlo se elaboran pronósticos meteorológicos que son dados a conocer por diversos medios, entre ellos el sitio de Internet del Servicio Meteorológico Nacional, para prevenir con suficiente anticipación la llegada a costas mexicanas de un ciclón tropical o la generación de tormentas severas sobre el territorio nacional.

Las variables que incluyen los pronósticos son las precipitaciones, por ejemplo, y factores como el orográfico, donde intervienen escurrimiento, oleaje, marea de tormenta y campo de viento producido.

Para definir de modo detallado los diversos impactos asociados con ciclones tropicales y tormentas severas, así como facilitar que las autoridades y la población puedan mitigar los efectos negativos de estos fenómenos (pérdida de vidas, de bienes materiales e infraestructura pública y los daños al medio ambiente), se diseñó el Centro Nacional de Huracanes y Tormentas Severas que, una vez creada, colaborará con el SMN, la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (CONAGUA) y otras instituciones. ❀





## CAPÍTULO 2 METEOROLOGÍA

### DEFINICIÓN

Debemos a Aristóteles el uso del término Meteorología —del griego *meteoros* (alto en el cielo) y *logia* (conocimiento, tratado)—, quien en su escrito *Acerca del cielo* (340 a. C.) lo definió como “todos los efectos que se pueden llamar comunes al aire y al agua y las formas y partes de la Tierra, y los efectos de sus partes”.

En los *Meteorológicos*, Aristóteles condensa el conocimiento en Meteorología, incluyendo estudios y conceptos sobre lluvia, nubes, viento, nieve, tormentas eléctricas y huracanes; además de astronomía, geografía y química.

Pese a que muchas de las ideas de Aristóteles permanecieron vigentes por casi dos mil años, fue la invención del barómetro de mercurio en 1644, y del termómetro, a fines del siglo XVI, los que marcaron el nacimiento de la Meteorología como ciencia.

De esta manera, quedó definida, posteriormente, como la ciencia que estudia a la atmósfera, a través de la investigación del tiempo y el clima, así como del estudio físico, dinámico y químico de la atmósfera terrestre.

La Meteorología incluye el estudio de las variaciones diarias de las condiciones atmosféricas (Sinóptica), el estudio de las propiedades eléctricas, ópticas y otros de la atmósfera (Física), la variación de los elementos meteorológicos cerca del suelo en un área pequeña (Micrometeorología), entre otros.

### HISTORIA

A lo largo de la historia, los seres humanos se han preguntado: ¿hoy habrá lluvia, calor, viento o frío?, ¿y mañana?, ¿cómo será la próxima estación?, ¿habrá buenos pastizales?, ¿agua suficiente para las siembras y el ganado?, ¿crecerán los arroyos?

El tiempo influye tanto en la vida de las personas, que es rarísima la actividad que no requiere de la intervención de la Meteorología, por eso en torno al estado del tiempo se creó una serie de mitos cuyos secretos eran guardados en lo más profundo del firmamento por un dios y otras divinidades.

Los fenómenos astronómicos y atmosféricos no tenían un sustento científico. Se creía que respondían a la voluntad de los dioses, que a veces premiaban a los humanos con



El hombre debió tomar en cuenta la lluvia y la temperatura para su producción agrícola.

lluvias abundantes, y otras los castigaban con sequías, granizadas, huracanes y demás catástrofes.

Como señaló el meteorólogo noruego Sverre Pettersen: “mucho antes de que empezara a tomar forma la ciencia tal como la conocemos hoy, los hombres observaron el cielo, notaron las características de las estaciones y procuraron organizar sus actividades en función del tiempo cambiante”.

En etapas cercanas al desarrollo de la agricultura, el hombre debió tomar en cuenta la lluvia y la temperatura para su producción agrícola. Fue un observador empírico, en todo momento perceptivo y alerta de las características de los fenómenos naturales que afectaban a sus comunidades, logrando predecir los cambios a muy corto plazo y de manera muy experimental.

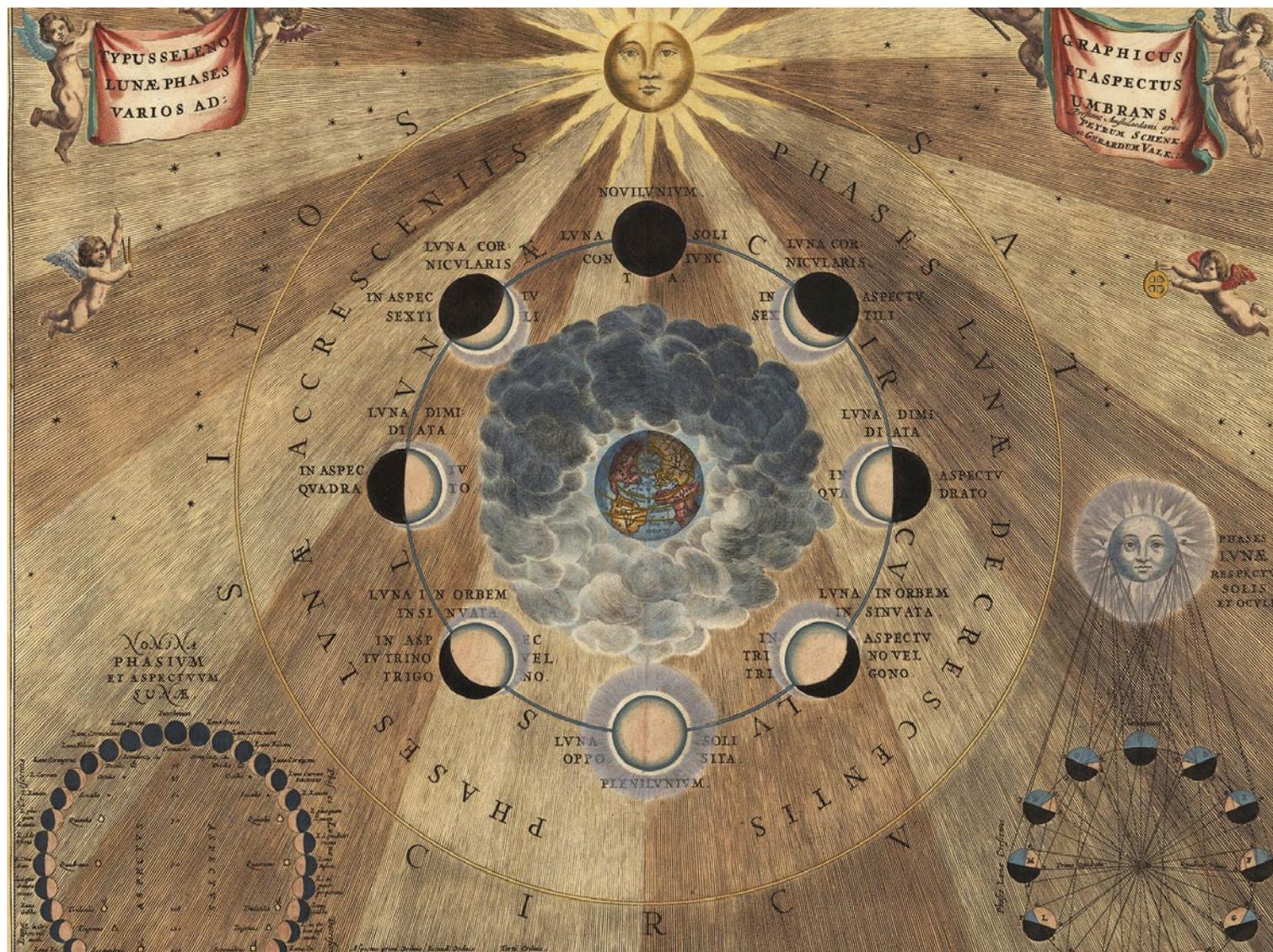
Quedaron testimonios de estas observaciones de tiempos remotos, por ejemplo, en el *Antiguo Testamento*, donde se aprecia a Jehová, rodeado de una tormenta de arena y acompañado de relámpagos, frente a Moisés.

Profetas y magos asociaron el tiempo atmosférico al estado anímico de sus dioses, por ejemplo, los griegos creyeron que Zeus, divinidad de los cielos y el mundo, liberaba la tempestad y lanzaba rayos a sus enemigos cuando se enojaba.

En la mitología escandinava, Eolo controlaba los vientos y Eos la hermosa aurora, Thor el trueno y los relámpagos, y Frey la lluvia y la luz. Los egipcios atribuían a Sati, la diosa del aire y del cielo, la creación de los relámpagos.

En la mitología inca Chuychu era la diosa del arco iris y Humanchuri el dios del trueno. Para los mayas, Chaac era la deidad de la lluvia y de los huracanes, por eso se le invocaba para tener buenas cosechas. Y los aztecas adoraban a Tláloc, el dios de la lluvia y del rayo.

Los astrónomos griegos recopilaban y sistematizaron su conocimiento empírico en los parapegmata, una especie de calendarios de piedra con las fechas de los principales acontecimientos astronómicos y meteorológicos del año, obte-



Se creía que la Tierra era el centro del universo.

nidas por la observación de las salidas y puestas de grupos estelares. Estos parapegmata se exponían públicamente en las plazas.

En los *Parapegmata de Gémino* se encuentra el origen del término canícula (veranillo) o *The dog days*, que designa a los días más cálidos del verano, con la aparición de Sirio por el horizonte Este al amanecer (Can Mayor) y el desplazamiento de los equinoccios por Procyon (la Perrita) <sup>8</sup>.

Aproximadamente en el año 600 a. C. Tales se estableció en la ciudad turca de Mileto, para iniciar profundas ob-

servaciones de la naturaleza, fue el primero en predecir un eclipse de Sol. El filósofo y astrónomo Anaximandro definió al viento como el aire en movimiento y señaló las épocas de los equinoccios y los solsticios.

Los primeros avances en el conocimiento de la naturaleza fueron en la Astronomía. Algunos filósofos, como Aristóteles, creían que la Tierra era el centro del universo y que todos los cuerpos celestes, considerados como esferas, se movían alrededor de ella. Para Empédocles (485-430 a. C.) la tierra, el agua, el aire y el fuego eran los cuatro elementos que constituían el universo. A partir de esta teoría Aristóteles le atribuyó características a los cuatro elementos: seco, húmedo, frío y caliente, respectivamente.

<sup>8</sup> Siglos después se descifró aquí el origen de la frase "hace un frío de perros", porque seis meses más tarde, en enero, es Sirio la estrella que sale en los primeros momentos de oscuridad de la noche, y brilla destacando entre todas las demás, particularmente cuando más intenso es el invierno.

# Y LA TIERRA DEJÓ DE SER EL CENTRO DEL UNIVERSO...

La fascinación que despiertan las estrellas, el Sol y la Luna es más que añeja. Desde que el hombre toma conciencia de su existencia, mira con inquietud el cielo y trata de entender cuál es su papel y dimensión en él. Comienza por la especulación filosófica, se entrega a las explicaciones de creación y deidades que da la fe, mientras un

inquieto deseo científico de comprobación lleva al desarrollo de la observación, la medición, el ensayo y la experimentación de fenómenos astronómicos que permitirán descubrir que la Tierra no es el centro del universo y que apenas sabemos una parte infinitesimal de lo que hay más allá de nuestro planeta.

## LA TIERRA COMO CENTRO DEL UNIVERSO

El creador del mundo "le ha dado la que mejor le conviene [...] la figura que le conviene es la figura que contiene en sí a todas las figuras posibles. Esta es la razón por la que Dios ha construido el mundo en forma esférica y circular [...] Esa es la más perfecta de todas las figuras". –**Platón**

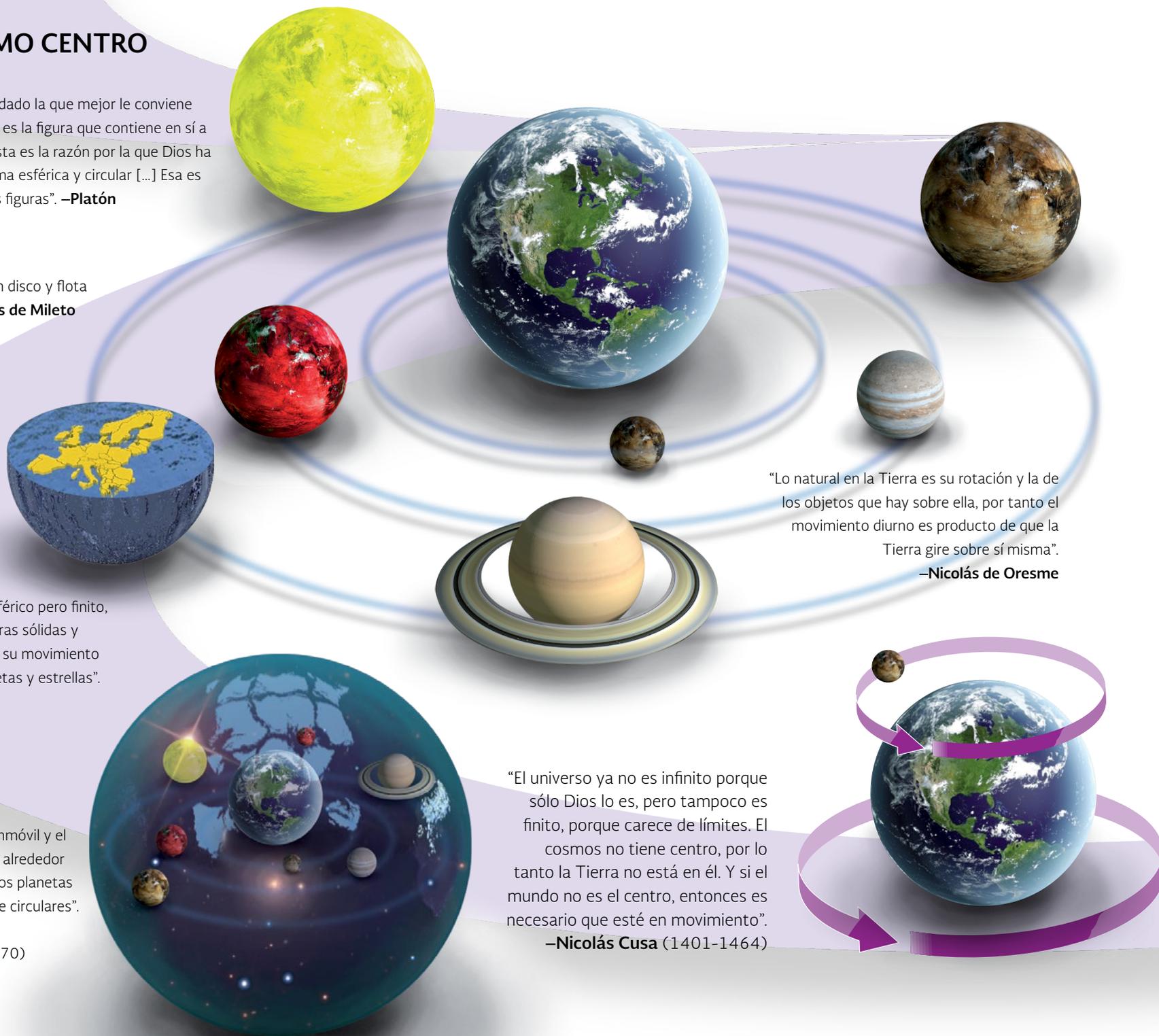
"La Tierra es plana, un disco y flota sobre el agua". –**Tales de Mileto**

"El universo es esférico pero finito, formado por esferas sólidas y cristalinas que en su movimiento transportan planetas y estrellas". –**Aristóteles**

"La Tierra es un cuerpo inmóvil y el centro del universo. A su alrededor giran el Sol, la Luna y otros planetas en órbitas perfectamente circulares". –**Claudio Ptolomeo** (alrededor del año 100-170)

"El universo ya no es infinito porque sólo Dios lo es, pero tampoco es finito, porque carece de límites. El cosmos no tiene centro, por lo tanto la Tierra no está en él. Y si el mundo no es el centro, entonces es necesario que esté en movimiento". –**Nicolás Cusa** (1401-1464)

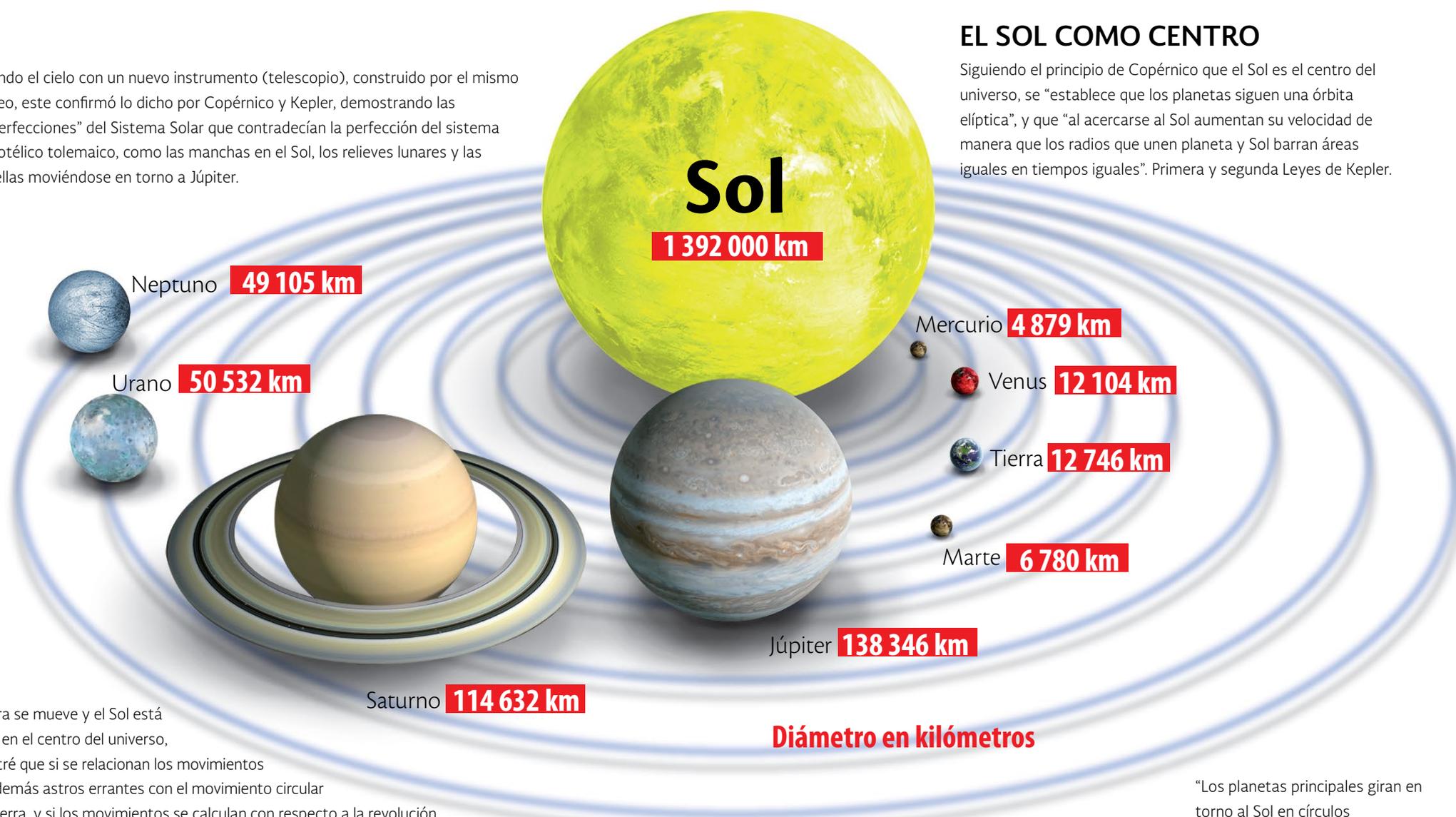
"Lo natural en la Tierra es su rotación y la de los objetos que hay sobre ella, por tanto el movimiento diurno es producto de que la Tierra gire sobre sí misma". –**Nicolás de Oresme**



Mirando el cielo con un nuevo instrumento (telescopio), construido por el mismo Galileo, este confirmó lo dicho por Copérnico y Kepler, demostrando las "imperfecciones" del Sistema Solar que contradecían la perfección del sistema aristotélico tolemaico, como las manchas en el Sol, los relieves lunares y las estrellas moviéndose en torno a Júpiter.

## EL SOL COMO CENTRO

Siguiendo el principio de Copérnico que el Sol es el centro del universo, se "establece que los planetas siguen una órbita elíptica", y que "al acercarse al Sol aumentan su velocidad de manera que los radios que unen planeta y Sol barran áreas iguales en tiempos iguales". Primera y segunda Leyes de Kepler.



La Tierra se mueve y el Sol está inmóvil en el centro del universo, "encontré que si se relacionan los movimientos de los demás astros errantes con el movimiento circular de la Tierra, y si los movimientos se calculan con respecto a la revolución de cada astro, no sólo de ahí se siguen los fenómenos de aquellos, sino que también se ponen en relación el orden y la magnitud de los astros y de todas las órbitas, e incluso del cielo mismo".

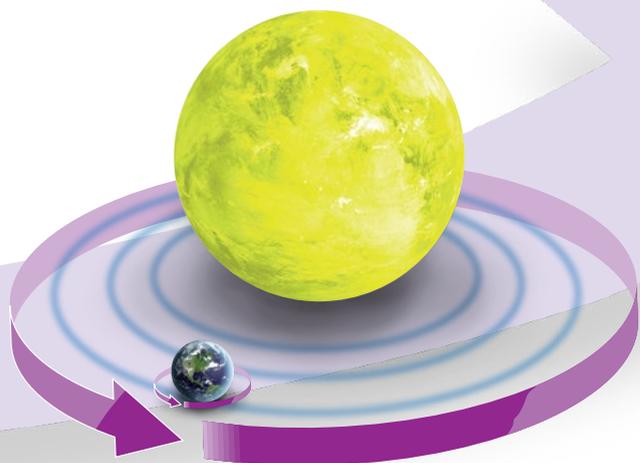
—Copérnico

## Diámetro en kilómetros



"En la teoría de la relatividad general, la ciencia del espacio y del tiempo, o cinemática, ya no se presenta como fundamento independiente del resto de la física. El comportamiento geométrico de los cuerpos y la marcha de los relojes dependen de los campos gravitatorios, que a su vez son producidos por la materia". —Albert Einstein

"Los planetas principales giran en torno al Sol en círculos concéntricos a él, con la misma dirección de movimientos y aproximadamente en el mismo plano [...] y si las estrellas fijas fueron centros de sistemas semejantes, todos ellos constituidos con un esquema similar, estarán sometidos al dominio de uno [...] y para que los sistemas de las fijas no caigan por la gravedad uno sobre otro, Él (Dios) los habría colocado a inmensas distancias uno de otro". —Newton



Los griegos, romanos e indios usaron las veletas para señalar la dirección de los vientos. Pese a que aproximadamente cinco siglos antes de Cristo, estas culturas medían la lluvia y predecían el estado del tiempo, sus observaciones estaban fuertemente ligadas a sus creencias religiosas, viéndose gravemente afectados los resultados por supersticiones, fantasías y preguntas para las que sólo había respuestas divinas.

Así, al principio de la historia, no había una distinción entre la Astronomía y la Meteorología, y menos una discriminación de los fenómenos celestes de los atmosféricos.

La predicción del tiempo, en muchos casos, dependía del día, del mes lunar o del año, así fue que nació la tradición oral de las cabañuelas, por ejemplo, que dice la Real Academia de la Lengua es el “cálculo que, observando las variaciones atmosféricas en los 12, 18 o 24 primeros días de enero o de agosto, forma el vulgo para pronosticar el tiempo que se espera para cada uno de los meses del mismo año o del siguiente”.

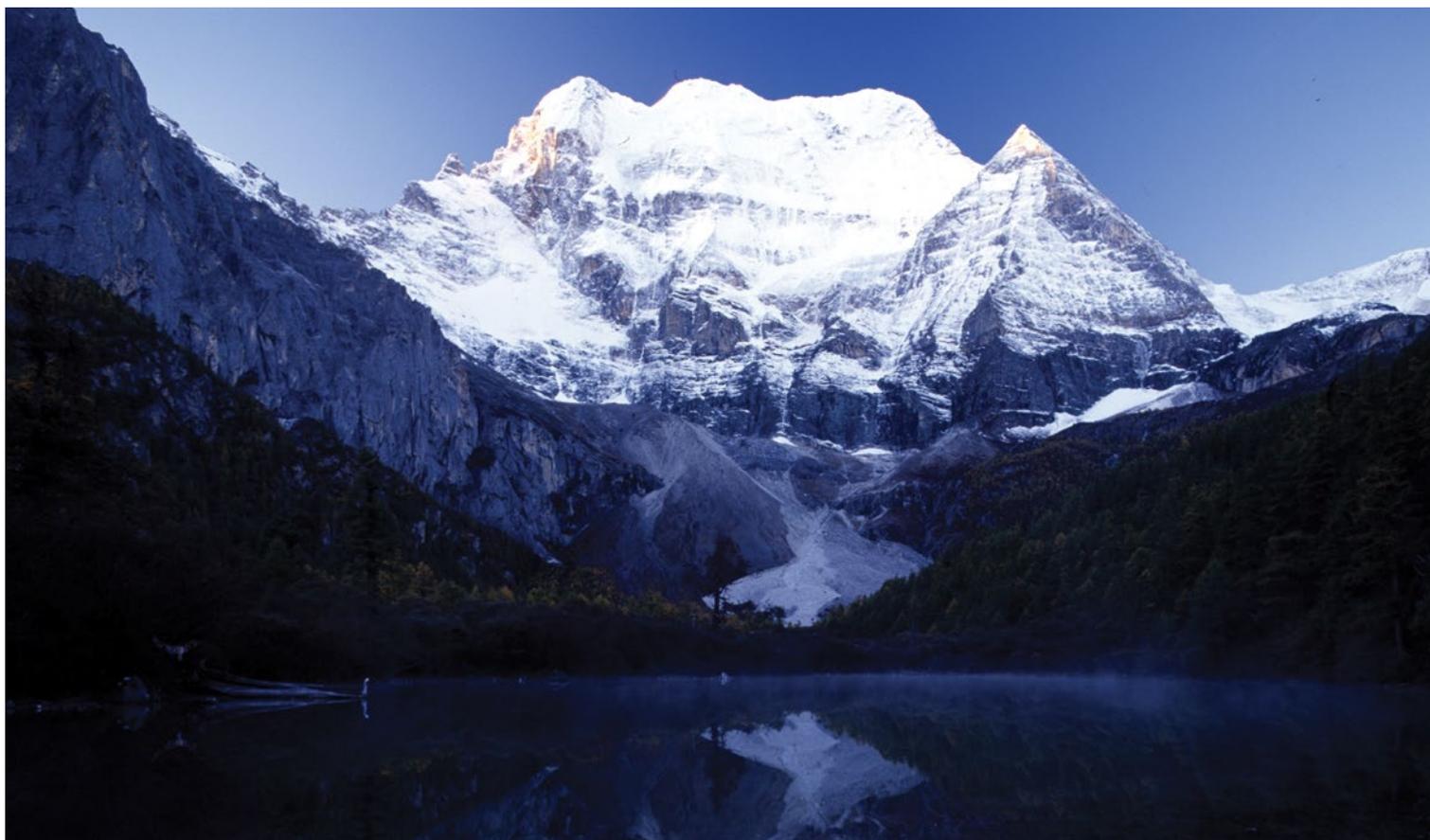
También se relacionaban los cambios de tiempo con el vuelo de las aves, la aparición de moscas y mosquitos, de

arañas, sapos, ranas, y del comportamiento del ganado vacuno y ovino, gallinas y gallos, incluso la cantidad de peces en el río tuvieron significados meteorológicos.

En los países de influencia céltica encontramos un método adivinatorio que empleaba el esternón del ganso que tradicionalmente se come el 11 de noviembre, día de San Martín. Si este era blanco era señal de que el invierno sería muy frío y con nieve abundante; moteado, significaba tiempo variable, pero si la mitad era blanco y la otra mitad negro, entonces una parte del invierno sería severa, y la otra relativamente suave.

### EL RENACIMIENTO Y LOS GRANDES DESCUBRIMIENTOS CIENTÍFICOS

El Renacimiento marcó el final de la Edad Media y el inicio del desarrollo comercial, cultural y científico. Con la exploración del mundo se dieron las grandes conquistas de América, Asia y África. En esta etapa también se produjeron importantes avances en la medición y la comprensión científica de la Meteorología



...si era blanco era señal de que el invierno sería muy frío.

El físico y matemático Isaac Newton (1642-1727) fundamentado en los descubrimientos de Galileo, explicó el movimiento de todos los cuerpos sólidos, líquidos y gaseosos. Mediante sus tres leyes de movimiento y la ley de gravitación universal ya no fue necesario imaginar la existencia de fuerzas sobrenaturales para explicar el desplazamiento de los cuerpos.

En 1662, el físico irlandés Robert Boyle dio a conocer la Ley de Boyle: “el volumen ocupado por una masa de gas a temperatura constante es inversamente proporcional a la presión que se ejerce sobre ella”; hallazgo que constituyó el primero de una serie de descubrimientos que condujeron al desarrollo de la Meteorología como ciencia.

Mientras Galileo Galilei construyó el primer termómetro, el físico italiano Evangelista Torricelli y el matemático italiano Vincenzo Viviani, ambos de origen italiano, en 1644, inventaban el barómetro de mercurio, con el cual se podía medir la presión ejercida por la atmósfera, a su vez Torricelli descubrió que la presión variaba de un día para otro.

Posteriormente, en 1648, el físico y matemático francés Blaise Pascal (1623-1662) subió una montaña de 1,600 metros con un barómetro y se encontró con que la presión atmosférica disminuía con la altura, otro importante descubrimiento para el auge de la Meteorología.

El astrónomo inglés Edmundo Halley (1656-1742) dio a conocer sus teorías sobre los vientos alisios y otros movimientos atmosféricos; poco después el científico y estadista Benjamín Franklin (1706-1790) descubrió que los rayos y truenos eran provocados por las cargas eléctricas de las tormentas, pudiendo demostrar así que los rayos y truenos tenían una naturaleza eléctrica; y que podían existir vientos giratorios alrededor de un centro de baja presión.

En 1664, Evangelista Torricelli llevó a cabo su conocido experimento de la columna de mercurio, que reveló que el aire pesaba y ejercía una presión sobre todos los cuerpos. La experiencia, además, le permitió medir la suma de la presión atmosférica.

Por su parte, Daniel Fahrenheit fabricó varios instrumentos meteorológicos, pero su mayor aportación a la Meteorología fue en 1714 cuando sustituyó el alcohol por mercurio en los termómetros y fabricó el termómetro de mercurio de alta precisión, posteriormente el físico sueco Anders Celsius (1701-1744) inventó la escala termométrica centesimal que lleva su nombre.

Durante el periodo que comprende de 1750 a 1900 se hicieron numerosos descubrimientos atmosféricos, principalmente derivados del auge que cobró la Meteorología y la creación de redes de observación; un gran impulsor fue la Sociedad Meteorológica Palatina que, entre 1780 y 1792, estableció 33 estaciones meteorológicas en distintas ciudades europeas.

Alrededor de 1750, el químico inglés Joseph Black (1728-1799) descubrió que la atmósfera era una mezcla de gases, posteriormente Daniel Rutherford comprobó que 80% de la atmósfera terrestre está constituida por nitrógeno.

En 1746, el matemático francés Jean d’Alembert (1717-1783) realizaba estudios sobre las causas de los vientos y



Franklin descubrió que los rayos tenían una naturaleza eléctrica.



...se obtuvieron miles de fotografías de la nubosidad terrestre.

los publicaba. Paralelamente, los científicos franceses Jean Baptiste Biot y Joseph Gay-Lussac ascendían en un globo a una altura superior a los 3,000 m, desde la superficie de la Tierra, con la finalidad de realizar medidas y observaciones atmosféricas.

Varios años después de las primeras incursiones para penetrar en las capas altas de la atmósfera, en 1804 se realizaron investigaciones desde un globo de hidrógeno.

El meteorólogo estadounidense James Espy (1785-1860) fue uno de los primeros científicos en proponer que el proceso de convección produciría nubes. En 1850 descubrió que la liberación de calor latente en la condensación de vapor de agua jugaba un rol muy importante en el crecimiento de las nubes convectivas.

Los estudios sobre Meteorología continuaron avanzando a buen ritmo y mientras el físico y meteorólogo francés Henri Bénard estudiaba las circulaciones convectivas del aire, el físico inglés Adán Walker inventaba el anemómetro (que mide la velocidad del viento) y el pluviógrafo (que hasta la fecha se emplea en las estaciones meteorológicas para recoger y medir, en milímetros, la cantidad de precipitaciones caídas en un lugar durante un tiempo determinado).

El meteorólogo francés León-Philippe Teisserenc de Bort sugirió que la atmósfera podía estar formada por sólo dos capas: la tropósfera y la estratósfera. La primera va desde la superficie hasta unos 12 km de altura, y en ella se llevan a cabo los fenómenos como tormentas, lluvia, vientos, etcétera. Y la segunda capa, ya sin fenómenos meteorológicos, compuesta por helio e hidrógeno.

Lord Rayleigh descubre en 1894 el argón y al año siguiente el helio. Él también se encargó de explicar el color azul del cielo y los procesos de convección que se forman en las nubes *altocumulus*.

Hacia finales del siglo XIX en varios países comenzaron a funcionar oficinas meteorológicas, y en 1873 se formó el primer Comité Internacional, que tiempo después evolucionó en la Organización Meteorológica Mundial (OMM), un organismo especializado de las Naciones Unidas, que sirve de portavoz del estado y el comportamiento de la atmósfera terrestre.

En 1900, el meteorólogo francés León-Philippe Teisserenc de Bort (1855-1913) observó las capas de la atmósfera por medio de globos y cohetes, particularmente estudió

la mesósfera y termósfera, y años más tarde, Kennelly y Heavyside descubren la ionósfera. Y en 1931 dos físicos suizos lograron ascender a la estratósfera en un globo hasta una altitud aproximada de 17 km.

Para 1938, un globo llamado Explorer II llegó hasta los 20 km. En 1960, los globos tripulados ya habían alcanzado alturas de más de 34 km, y los que no llevaban a nadie ascendieron cerca de los 47 km. Con lo anterior, se pudo explicar la estructura vertical de las distintas variables atmosféricas.

Y pronto llegó la era espacial cuando el 4 de octubre de 1957 la Unión Soviética puso en órbita el primer satélite *Sputnik I*, posteriormente, el 1 de abril de 1960, Estados Unidos de América lanzó el primer satélite meteorológico: El *Tiros I*, con el que se obtuvieron miles de fotografías de la nubosidad terrestre y se pudieron hacer las primeras investigaciones de los fenómenos meteorológicos de distintas regiones del mundo, así como de la generación y evolución de los huracanes.

Es hacia finales de la década de los sesenta que los servicios meteorológicos de distintos países usaron con regularidad imágenes de satélite para hacer sus predicciones.



Sistema de navegación aérea en la segunda Guerra Mundial.

El famoso término meteorológico: “corriente en chorro” se descubre por japoneses y estadounidenses durante la segunda Guerra Mundial, el concepto alude a un fenómeno que se localiza en las latitudes medias a una altura promedio de 8-12 km, donde se observan vientos con intensidades de 120 a 800 km/h, que soplan de Oeste a Este. Muchas fuentes atribuyen su descubrimiento a los vuelos realizados durante la segunda Guerra Mundial, cuando los pilotos aliados en sus trayectos entre Estados Unidos de América y Gran Bretaña notificaron la existencia de vientos superiores a los 160 km/h.

Posteriormente se evidenció la conexión entre los sistemas ondulatorios de la alta tropósfera con el desarrollo de los distintos fenómenos en la superficie.

A finales del siglo XIX y principios del XX, los científicos le otorgaron una gran atención al estudio de los fenómenos atmosféricos, principalmente al pronóstico del estado del tiempo, para entonces ya contaban con distintos instrumentos de cómputo y aparatos de observación y medición, además de organizaciones de redes locales de observación.

En 1901, el meteorólogo americano Clevelan Abbe propuso cambiar los métodos subjetivos y empíricos del pronós-



La segunda Guerra Mundial impulsó el avance meteorológico.



Observaciones satelitales.

tico del tiempo a métodos matemáticos y científicos. Tres años después, el físico noruego Vilhelm Bjerknes se unió a la idea. Sin embargo, la limitación de la tecnología no permitió encontrar un camino para hacer un pronóstico matemático del estado del tiempo.

En 1927, el meteorólogo finlandés Vilho Vaisalla inventó la radiosonda o globo sonda, instrumento que recolecta variables meteorológicas a corto plazo como temperatura, humedad y presión atmosférica, así como del viento en altitud.

Durante la segunda Guerra Mundial la red de observaciones de altura tuvo un importante avance, lográndose así la primera imagen tridimensional de una tormenta tropical.

En 1944, Jacob Bjerknes y Jorgen Holmboe trabajaron en la teoría de la dinámica de los ciclones tropicales, y poco después, el meteorólogo americano Jule Charney, la usó junto con la tesis de las ondas de Rossby para estudiar la ciclogénesis de las tormentas, utilizando ya los modelos numéricos.

En 1946, el físico húngaro John Von Neumann (1893-1957) profesor de la Universidad de Princeton, en Nueva Jersey, Estados Unidos, desarrolló el primer modelo computacional de pronóstico del tiempo, con ayuda de la computadora Maniac.

En la actualidad hay satélites meteorológicos orbitando la Tierra para la observación continua de la atmósfera y la superficie, para transmitir así información e imágenes de los diversos parámetros atmosféricos y oceánicos. Y es la Organización Meteorológica Mundial la que tiene a su cargo la coordinación de los programas mundiales para operar la red mundial de datos atmosféricos.

La utilización de satélites meteorológicos comenzó en la década de los 60 del siglo XX, y hoy existen dos tipos: los que se ubican en órbita polar (se mueven alrededor de la Tierra y pasan por los polos una vez cada 24 horas), y los que están en órbita geoestacionaria (situados a 36,000 km sobre la superficie terrestre y fijos con respecto al Ecuador terrestre).

Los satélites meteorológicos contribuyen a la observación y detección oportuna del desarrollo de ciclones tropicales, además, con ayuda de los satélites de comunicación se estableció, a nivel mundial, un sistema de avisos que prevenga a la población.

A la fecha se han inaugurado muchas universidades y centros de investigación especializados en Meteorología, para la recopilación y estudio de datos, diagnósticos y predicciones del estado del tiempo. Dichas

investigaciones e informaciones se transmiten simultáneamente a distintos centros receptores en el mundo.

### LA METEOROLOGÍA EN MÉXICO ANTECEDENTES PREHISPÁNICOS

Para las civilizaciones prehispánicas la astronomía era muy importante, por eso se construyeron observatorios que permitieran investigaciones sobre los movimientos del Sol, la Luna y planetas como Venus y Marte.

Para los aztecas las eras o tiempos se medían por soles, y el final o etapas de transición por cataclismos. De ahí que el calendario azteca o piedra del Sol, el monolito circular más antiguo que se conserva de esta cultura prehispánica, tenga cuatro figuras en representación de las eras transcurridas hasta 1479, flanqueando al quinto Sol, en el centro, con el rostro de Tonatiuh, el dios del Sol. El círculo exterior lo forman 20 áreas que representan los días de cada uno de los 18 meses de los 365 días del año solar. Los mexicas incorporaban 5 días aciagos que, en conjunto, constituían el calendario azteca.

Pero los antiguos mexicanos no sólo desarrollaron la Astronomía y un calendario, sino que también abarcaron la

Meteorología y sus conocimientos los aplicaron en favor de la agricultura. Efectuaban la mayor parte de los pronósticos del tiempo observando los cuerpos celestes, los fenómenos meteorológicos y de la propia naturaleza, por ejemplo, el comportamiento de los animales ante el cambio de las estaciones.

El viento y la lluvia fueron los principales elementos meteorológicos estudiados, de ahí que se distinguían diferentes tipos, que variaban de intensidad según la temporada y en función de su dirección y fuerza.

Los aztecas eran politeístas, pero su mayor veneración recaía en los dioses que simbolizaban la lluvia, el agua, el rayo o el viento. El más representativo fue Tláloc, del que se cuentan hasta 26 advocaciones. Y en otras antiguas culturas mexicanas figuraban Chaac para los mayas, Cociyo para los zapotecos, Dzahui para los mixtecos y Tajín para los totonacas, por mencionar algunos cuantos.

Al observar las figuras de estas deidades se aprecia que los rasgos son muy parecidos, y tienen como característica común que el conjunto que forman la cara y la cabeza representa la lluvia y las nubes.

En varias figuras se les aprecia vertiendo agua con jarras u otro tipo de recipientes, como el Tláloc de cuya mano



Observatorio maya.



Tláloc y Quetzalcóatl en Teotihuacán.

derecha brota agua, al igual que de la serpiente que sostiene con la mano izquierda, así como de entre sus piernas y de otros de sus orificios naturales. Estas imágenes de los diferentes dioses de la lluvia se repiten en grabados, códices, urnas, jarrones y otros recipientes.

Para nuestros antepasados era atribución de estos dioses proveer de las lluvias en beneficio de hierbas, árboles y frutas; aunque también eran quienes enviaban el granizo, las tempestades, los relámpagos y rayos. Y cuando los dioses se reunían con remolinos de viento se transformaban en huracanes y se fusionaban o unían con otras deidades, dando pie a la hierogamia.

Los aztecas llamaban Mixtecapan al país de las lluvias. En códices nahuas se dice que el agua viene de Tlalocan, la casa de Tláloc, sin embargo, también se pensaba que las nubes y las semillas provenían del interior de las montañas y la acción del viento las llevaba hacia la cumbre. Los que habitaban cerca de las costas creían que las nubes venían del mar. El rayo o trueno, el viento, el arco iris, el hielo, el granizo y el chahuiscle (plaga) eran vinculados con la lluvia o se oponían a ella, pero igual provenían del interior de la montaña.

La lluvia y el rayo o trueno fueron asociados con el maíz, porque había una coincidencia entre la temporada de lluvias y el crecimiento de la planta.

Así como existieron en Mesoamérica observadores que se apoyaban en las investigaciones astronómicas, también hubo quienes tomaban en cuenta los graznidos de aves y los sacrificios de animales “de agua” para realizar predicciones del tiempo y calcular el ciclo de las lluvias y tener buenas cosechas. Por ejemplo, en Tlaxcala se acostumbraba abrirle el vientre a venados o jabalíes para saber qué pasaría. Si encontraban hierbas verdes o granos de maíz, significaba que el año sería abundante en cosecha, de lo contrario era un mal presagio, una señal de hambruna. Además, el éxito de la agricultura estaba supeditado también a los reiterados ritos de adoración y el sacrificio de seres humanos para lograr buenas cosechas y alejar tormentas y granizo que pudieran dañar los cultivos.

Este sincretismo entre ciencia empírica y religión alcanzó, inclusive, al juego de pelota en el Tajín, Veracruz, cuyas pelotas se colocaron como ofrenda en un manantial sagrado.

A los indígenas que practicaban estas observaciones y realizaban pronósticos se les conocía como: *teciuhtlazqui* (el

que vence al granizo), *tlaciuhque* (el que pronosticaba el temporal) y, actualmente, graniceros, tiemposeros o aguadores.

En la era prehispánica, las peticiones de lluvia siempre se realizaron en pirámides, montañas o volcanes, donde se creía que había una conexión entre la tierra y el cielo, y donde surgieron los meteorólogos empíricos del México antiguo.

Durante el siglo XIX la actividad científica estuvo a cargo de un equipo de profesionistas y aprendices que desarrollaron estudios sobre las ciencias de la Tierra, específicamente Geografía, Geología, Mineralogía y Meteorología.

Los resultados del estudio del clima derivados de la observación y el registro sistemático del estado del tiempo, aportarían beneficios prácticos para el desarrollo de la agricultura, la protección de la navegación y la prevención de los desastres. Así, en 1824, aparecieron las primeras publicaciones en los diarios nacionales de registros de observaciones diarias. En el periódico *El Sol*, por ejemplo, se difundieron datos de temperatura en grados Celsius, presión barométrica, precipitación medida en pulgadas y líneas, higrometría, electricidad y viento. Esta práctica se extendió hasta el 14 de enero de 1828.

En 1833 se creó la Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística (SMGE), que agrupó a la comunidad científica e intelectual del país. Dicha organización contó con una sección dedicada al estudio de la Astronomía y la Meteorología, publicándose los primeros artículos relacionados con el estudio del clima y un volumen significativo de tablas y registros meteorológicos.

### EL ÁMBITO NACIONAL E INTERNACIONAL 1841-1876

La Meteorología convertida en una disciplina científica, abrió instituciones especializadas en la enseñanza de esta nueva disciplina. Teniendo como antecedentes el inicio del registro diario de los datos del estado del tiempo por parte del Royal Greenwich Observatory de Londres, la invención del telégrafo en 1832 y la estandarización de los instrumentos para la elaboración de los primeros Mapas del Tiempo, con datos meteorológicos de la red establecida en Estados Unidos de América.

### EN LOS COLEGIOS MEXICANOS

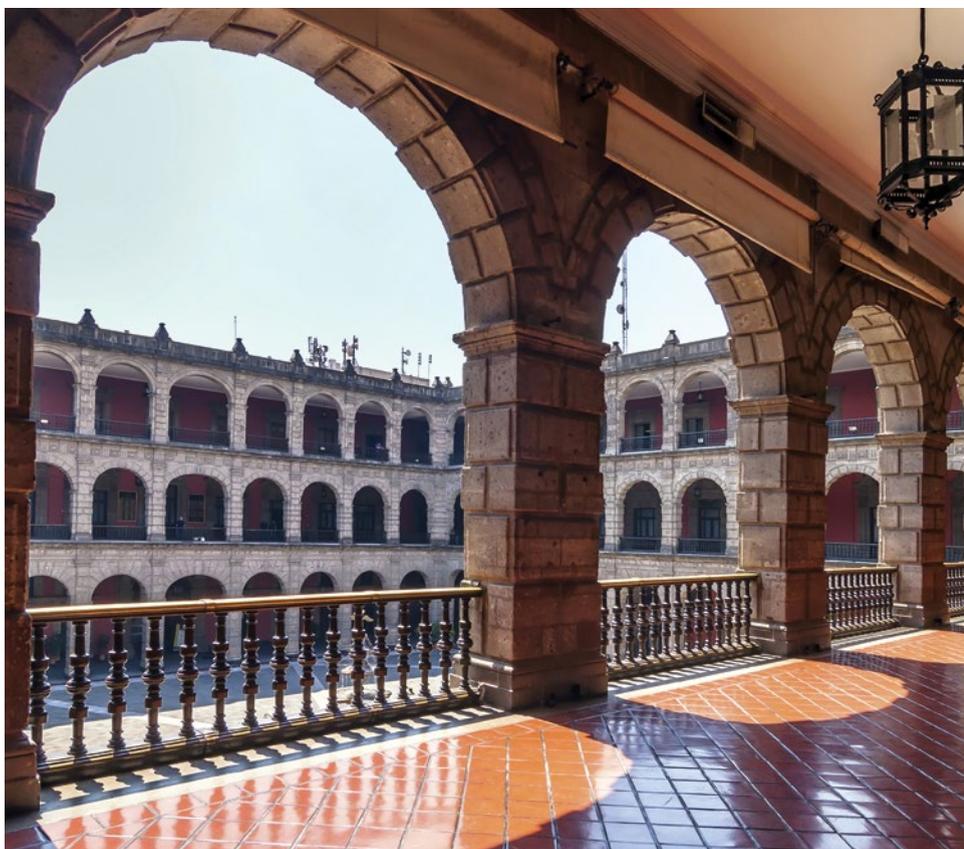
La Meteorología se impartía en las clases de Física del Colegio de Minería, en la Escuela de Agricultura, en la Es-



Royal Greenwich Observatory.



Alcázar de Chapultepec.



Interior de Palacio Nacional.

cuela Nacional Preparatoria (ENP) y en la de Ingeniería, pero fue en la ENP que se le relacionó con la enseñanza práctica y con el apoyo de Mariano Bárcena, en 1883, se acordó que todos los alumnos de Física asistieran al observatorio para realizar sus prácticas de observaciones meteorológicas.

Ese mismo año se reformó el plan de estudios de la Escuela de Ingeniería, incorporando la asignatura de Meteorología e Hidrografía a las carreras de Ingeniero Geógrafo e Ingeniero Telegrafista.

Además, en cada uno de estos colegios se instaló un observatorio meteorológico donde los alumnos realizaban lecturas y registros del estado del tiempo, surgiendo pequeños observatorios tanto en la Ciudad de México como en el interior del país.

La organización y dirección de las actividades científicas, así como el desarrollo de las vías de comunicación y las obras públicas quedaron bajo el auspicio del Ministerio de Fomento, Colonización, Industria, que creó el presidente Santa Anna. Con los años, esta dependencia se convertiría en el organismo que promovería y crearía los proyectos e instituciones relacionados con la práctica científica, como el Observatorio Meteorológico (1832).

Un año después, el 21 de enero, nació Francisco Díaz Covarrubias, uno de los científicos más destacados de México, graduado en Ingeniería Topográfica que, durante la presidencia de Benito Juárez, se convertiría en titular de la Dirección General de Caminos y Peajes del Ministerio de Fomento (1867-1876).

En 1862, Díaz Covarrubias fue nombrado director del Observatorio Astronómico y a él correspondió trasladarlo de Chapultepec a San Luis Potosí, y luego a Tampico, cuando el ejército francés buscó tomar la Ciudad de México (1863) respaldando al efímero imperio de Maximiliano de Habsburgo. Terminada la intervención y restituido el gobierno juarista, Francisco Díaz devolvió el observatorio a la capital.

En abril de 1877, el Observatorio Meteorológico Central (OMC) por invitación del general Albert J. Myer, del Congreso Internacional de Meteorólogos, ingresó al Servicio Meteorológico Internacional Simultáneo, convirtiéndose México en el miembro 19.

Años más tarde, nuestro país se encontró entre los 23 países del mundo que realizaban observaciones meteorológicas de forma periódica y sistemática.

### LA CONSOLIDACIÓN EN MÉXICO

La Meteorología nace como una aplicación de la Física para el conocimiento y estudio de los fenómenos atmosféricos, para mostrar las condiciones del tiempo y dar una explicación lógica a los sucesos de la atmósfera.

En 1790, se establecieron las primeras redes de observación en México y se instaló el observatorio meteorológico de San Juan de Ulúa, Veracruz –el más antiguo en tierra firme en América–, bajo la dirección del ingeniero Daniel Lárraga.

Sin embargo, es hasta el 18 de diciembre de 1876 cuando se creó un observatorio astronómico a cargo del gobierno. La idea provenía de Vicente Riva Palacio, ministro de Fomento, Colonización, Industria y Comercio, ante la necesidad de recabar, estudiar y manejar los datos obtenidos de las mediciones meteorológicas y que podían prever o menguar la sequía que se presentaba en el país. Es así que el presidente Porfirio Díaz decreta la creación de un Observatorio Meteorológico y Magnético, establecido en el Palacio Nacional el 6 de marzo de 1877. Su primer director fue el ingeniero Mariano Bárcena.

En este observatorio se realizaron las primeras mediciones sistemáticas de la atmósfera, de acuerdo a las normas internacionales, en las que se llevaba a cabo un registro diario de presión, temperatura, humedad, fenómenos especiales y registros magnéticos.

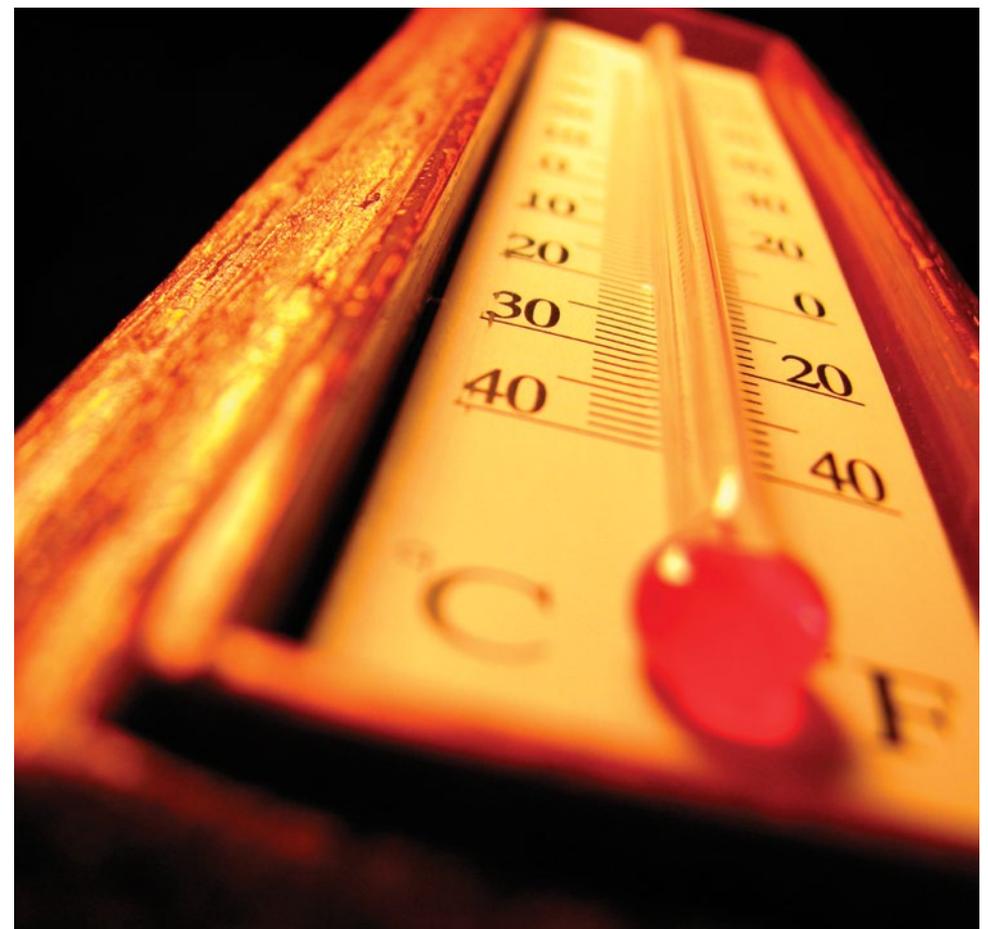
Los instrumentos para la medición de las variables meteorológicas que se utilizaron fueron el barómetro de mercurio, el termómetro de máxima y mínima, el pluviómetro de observación directa, el evaporómetro o evaporímetro, el anemómetro y el anemoscopio.

A partir de 1880, el OMC obtuvo un presupuesto federal independiente y un espacio adecuado para la observación y estudio meteorológico las 24 horas del día, integrando en su equipo de trabajo a Mariano Bárcena (director), Vicente Reyes (subdirector) y Miguel Pérez, José L. Collazo y José Zendejas (observadores). Además, contó con el apoyo de la oficina Central de Telégrafos que permitió la conexión y envío de los mensajes entre las estaciones foráneas y el observatorio.

En 1901 y ya con 31 secciones meteorológicas estatales, que controlaban los observatorios y las estaciones climatológicas, se creó el Servicio Meteorológico Mexicano a cargo del ingeniero Manuel E. Pastrana. Y el 1 de julio de 1911 la Secretaría de Fomento le asignó el presupuesto para trasla-



Barómetro.



Termómetro.



Radar meteorológico.

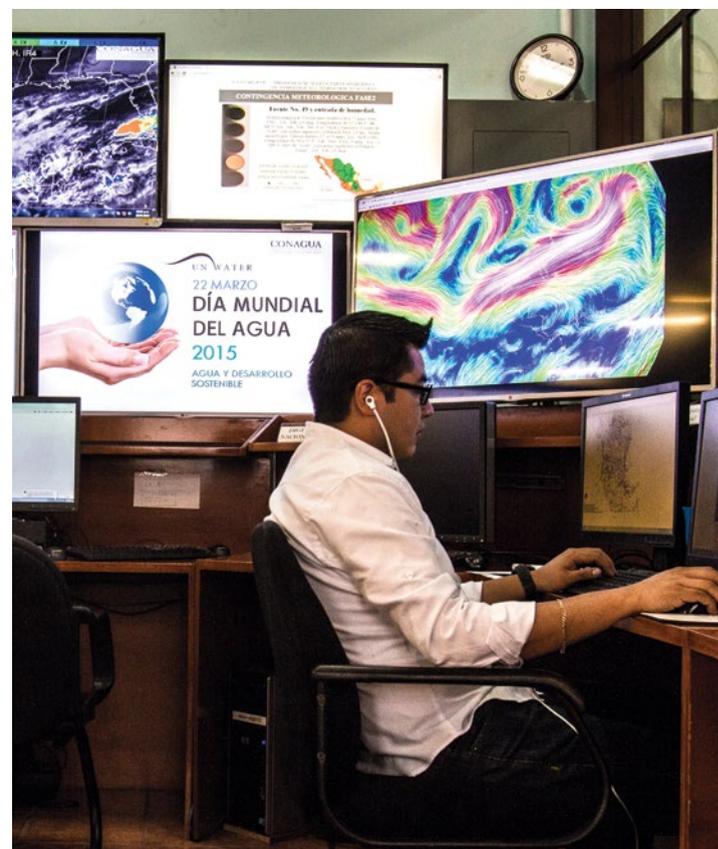
dar el Observatorio Meteorológico a Tacubaya. Recinto que hoy alberga al Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

En 1916, al crearse la Dirección de Estudios Geográficos y Climatológicos, se reanudó la red de observatorios meteorológicos y se desarrolló la red de estaciones climatológicas en varias instituciones, con ayuda de organismos agrícolas.

Para 1928 y bajo la dirección del ingeniero Toribio Corbalá se creó la Dirección General de Geografía, Meteorología e Hidrología, bajo el auspicio de la Secretaría de Agricultura y Fomento. Seis años más tarde se publicó el primer *Atlas Climático de la República Mexicana*, con una serie de mapas de distribución de lluvia, temperatura y humedad relativa media.

El 21 de diciembre de 1946 es promulgada la Ley de Secretarías y Departamentos de Estados, por el presidente Manuel Ávila Camacho, con la cual se creó la Secretaría de Recursos Hidráulicos que se encargaría de las instituciones relativas al estudio de la hidrografía, así como de los departamentos de Aguas de la Dirección de Geografía e Hidrología.

En tanto que la Dirección General de Geografía y Meteorología, con una red de 5 mil estaciones climatológicas, fue dependiente de la Secretaría de Agricultura y Ganadería.



Seguimiento meteorológico.

En conjunto con la Armada y Fuerza Aérea Mexicana, la Secretaría de Recursos Hidráulicos incrementó las redes de observación, que hasta ese momento contaba con más de 50 estaciones sinópticas, así como el número de servicios meteorológicos.

Por su parte, los observatorios meteorológicos de Mazatlán y Veracruz dieron paso a los Centros Regionales de Pronóstico para el Pacífico y el Atlántico, difundiendo datos y pronósticos, además de apoyo a la navegación marítima, a través de las radiodifusoras del Pacífico.

En el Golfo de México, el Observatorio de Veracruz dio origen a un Centro Regional, que realiza investigaciones para el pronóstico de ciclones tropicales en el Atlántico, Golfo de México y en el Pacífico. Destacó el estudio de los sistemas invernales sobre el golfo realizado por el ingeniero Ernesto Domínguez Aguirre, que tiempo después permitió al profesor César Luna Bauza emitir publicaciones sobre ciclones tropicales.

En lo correspondiente al Observatorio Meteorológico de Guadalajara, fue su director, el presbítero Severo Díaz, quien desarrolló y publicó en 1945, el pronóstico a largo plazo en México.

Entre 1947 a 1960 México firmó una serie de convenios con Estados Unidos de América, para el intercambio de información de los pronósticos y para normalizar las observaciones. Entonces el Servicio Meteorológico Nacional se encontraba bajo la tutela del ingeniero Federico Peña Aguirre, quien amplió las redes de observatorios, estaciones aerológicas de globos piloto y de radiosondeos.

Así, en 1948 en la Ciudad de México, Mérida y Mazatlán se registraron los primeros datos de la atmósfera superior, utilizando equipos con teodolito de rastreo manual. Asimismo, se instalaron estaciones de globo piloto en varias ciudades del país, que se fueron sustituyendo paulatinamente por las estaciones de radiosondeo viento.

En 1952 inició la medición por medio de radiosondeo en Veracruz, y en 1964 comenzó a operar esta herramienta en Chihuahua, Empalme y Monterrey, proporcionando una mayor altura y mejor registro sobre el comportamiento de la atmósfera, a su vez se trazaron cartas a diferentes niveles y se aplicaron los conocimientos de la termodinámica para el trazo de los diagramas de cada lugar.

Entre 1960 y los primeros meses de 1971 se continuó con el programa de desarrollo en la Dirección General de Geografía y Meteorología, dando impulso al crecimiento de las redes, a su mantenimiento y calibración por medio de un laboratorio meteorológico y a la supervisión de los observatorios y estaciones climatológicas, a través de un grupo de inspectores. También fue el inicio de la difusión del pronóstico a través de los medios de comunicación y el uso de las imágenes de satélite.

En ese mismo año, por acuerdo presidencial, se creó la Comisión del Sistema Meteorológico Nacional con representantes de varias dependencias oficiales y la operación de ocho estaciones de radiosondeo de viento y al menos 500 estaciones climatológicas renovadas en sus equipos.

La primera etapa de desarrollo del Servicio Meteorológico Nacional ocupó buena parte de la década de los 60, del siglo XX. En ese entonces quedó dependiente de la Dirección General de Geografía y Meteorología. Su director fue el meteorólogo Silvino Aguilar Anguiano, quien adquirió un sistema de baja resolución GOES, para la recepción de bandas visibles e infrarrojas recibidas cada media hora en for-



Servicio Meteorológico Nacional.



Se colaboró en las observaciones con la Marina de México.

ma digital, con suministro de película fotográfica de proceso seco para impresiones en papel sepia.

El 5 de abril de 1973, por orden del presidente Luis Echeverría Álvarez, se estableció la Comisión del Sistema Meteorológico Nacional, instancia que integraba las instituciones que operaban servicios y actividades meteorológicas, además de capacitación y formación del personal técnico y profesional como: la Secretaría de Agricultura y Ganadería, Secretaría de Recursos Hidráulicos, Comunicaciones y Transportes, Fuerza Aérea, Armada de México, Comisión Federal de Electricidad, Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Adiestramiento de Aviación Civil, Escuela Militar de Meteorología y la Secretaría de Educación Pública.

Más tarde se instauró el Comité Nacional de Agrometeorología y el SMN estableció una coordinación entre México y la Organización Meteorológica Mundial acrecentando su participación en las distintas áreas de dicha institución, como Sistemas Básicos, Instrumental y Métodos de Observación, Hidrología, Ciencias Atmosféricas, Meteorología Aeronáutica, Meteorología Agrícola, Meteorología Marina y Climatología.

Uno de los sucesos dignos de resaltar fue la participación de México en el primer experimento tropical de la atmósfe-

ra para mejorar el pronóstico, a través de un programa de observación continental con las redes de estaciones sinópticas de superficie y altura, y con observaciones desde un buque de la Secretaría de Marina sobre el Pacífico Sur. La comitiva fue integrada por meteorólogos de estudios especiales, previsión del tiempo y del Servicio Meteorológico de la Fuerza Aérea Mexicana.

Como resultado se obtuvo el compendio más completo de variables meteorológicas, que dio lugar a nuevos métodos de análisis de la predicción meteorológica operativa, así como el financiamiento para el sistema de satélites de órbita geoestacionaria y polar que constituyen, actualmente, la base de la vigilancia meteorológica, no sólo en México, sino en el mundo.

Entre 1977 y 1982 se reestructuró la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), y la Dirección General de Geografía y Meteorología fue nombrada Dirección General del Servicio Meteorológico Nacional (DGSMN), así como el Departamento de Hidrometeorología y Previsión de la Dirección de Hidrología. También se creó la Subdirección General de dicho órgano, ampliando algunas áreas técnicas que estaban en operación con funciones limitadas. Fue entonces que se determinó como objetivo principal del SMN “captar y difun-

dir la información meteorológica oportuna a efecto de contar con los elementos necesarios para prevenir y disminuir eficientemente los efectos de las perturbaciones atmosféricas”.

En los ochenta se consolidó la vigilancia meteorológica, gracias a la utilización de las nuevas tecnologías, instrumentación novedosa y comunicaciones más rápidas, además de la amplia capacidad para manejar un mayor número de datos. Lo que permitió una mejor recepción de información ante la presencia de eventos meteorológicos severos como el huracán *Gilbert*, en 1988. El aumento de la demanda de información por los efectos ocasionados por este ciclón, marcó el inicio de la coordinación con el Sistema Nacional de Protección Civil y el Centro Regional de Huracanes de Miami.

En el periodo de 1982-1988 y como parte del Programa de Preparación y Difusión de la Información Meteorológica, se elaboraban tres boletines diarios, además de informes meteorológicos en caso de fenómenos severos como ciclones tropicales o heladas.

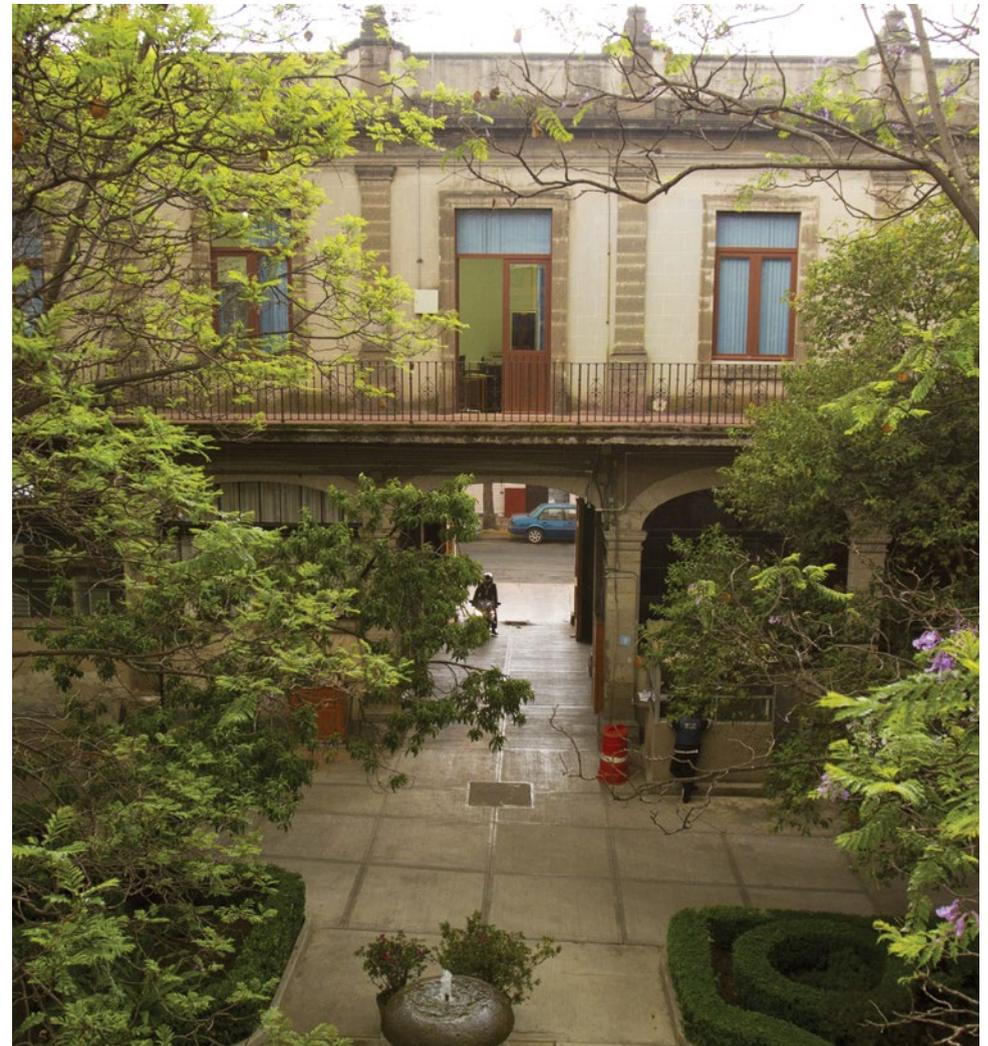
Entre 1990 y 1994 se implementa el envío de información meteorológica al Centro Nacional de Telecomunicaciones Meteorológicas (CNTM) del SMN, vía módem, y su retransmisión se realiza a través del satélite Morelos. El envío de información de la Región Meteorológica IV al CNTM es a través del satélite Galaxi III, que poco tiempo después fue sustituido.

Años más tarde, con la aparición del sistema de navegación web, el SMN implementa en la red de observatorios un sistema de captura, validación, codificación y envío de la información cuantificada denominado SICA y en el CNTM se inicia la recepción de datos meteorológicos en forma automática a través de Internet e Intranet.

En forma paralela, los centros regionales comenzaron a preparar información más detallada para cada región, con el propósito de emitir avisos de condiciones meteorológicas significativas para ayudar a las agencias meteorológicas nacionales y que, posteriormente, adaptarían a las necesidades de cada país.

Como parte del Plan Nacional de Desarrollo 1995-2000, el SMN impulsó la modernización de los sistemas de obtención y manejo de la información climatológica, así como la operación de sus redes para enviar pronósticos, boletines y avisos con mayor precisión y oportunidad al Sistema Nacional de Protección Civil (Sinaproc).

El SMN continuó con la modernización de sus equipos e instrumentos con el Plan Nacional de Desarrollo 2001-2006.



Sede del SMN en Tacubaya.

Tomando en cuenta la política ambiental a nivel mundial, se impulsó la digitalización de la información climatológica con énfasis en la calidad de los datos.

En los últimos años, el desempeño del SMN ha tenido una estrecha colaboración con el resto de las instituciones componentes del Sinaproc, similar al que tienen los países desarrollados.

Entre 2005 y 2010 se amplió la red de estaciones meteorológicas automáticas, se instalaron mayor número de estaciones sinópticas automáticas y radares. Y tras un diagnóstico de la OMM se integró un Consejo Técnico Asesor integrado por la Secretaría de Gobernación, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, la Universidad Nacional Autónoma de México, entre otras instituciones.

Hoy el SMN se ha convertido en el primer eslabón de la cadena del Sistema Nacional de Protección Civil, ya que



Las escalas para medir la temperatura son °C y °F.

gracias a la Meteorología se ha logrado proteger la vida y los bienes de los mexicanos. Así, el Servicio Meteorológico Nacional podría considerarse un arma poderosa, sin ella no se podría enfrentar del todo la batalla de las condiciones meteorológicas a las que nuestro país se ve expuesto.

### DEFINICIÓN DE TIEMPO METEOROLÓGICO<sup>9</sup>

Término que se utiliza para describir las variaciones diarias de la atmósfera. Es siempre cambiante y está compuesto por siete elementos: la temperatura del aire, los valores de presión atmosférica, la humedad, la nubosidad, la precipitación, la visibilidad y el viento.

### LA TEMPERATURA

Los seres humanos percibimos la temperatura como calor o frío.

En el planeta cuando el termómetro marca entre 19 y 21°C, experimentamos una sensación agradable, pero si comenzáramos a ascender en línea recta sentiríamos cómo

la temperatura baja, porque a mayor altitud más frío. Sin embargo, este cambio es gradual ya que existen diferentes capas atmosféricas: tropósfera, tropopausa, estratósfera, estratopausa, mesósfera, mesopausa y termósfera; esta última ubicada entre los 90 y 120 km de altura.

Existe una variación diaria y anual de la temperatura para cada sitio, así como escalas para medirla, por ejemplo, en México utilizamos grados centígrados (°C) y en otros países grados Fahrenheit (°F). En tanto que para los estudios formales científicos se utilizan los grados Kelvin (°K), ya que la temperatura es una medición del movimiento molecular y cuando se alcanza teóricamente el 0.0°K, cesa.

### LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA

“En virtud de su peso, la atmósfera gaseosa de la Tierra ejerce una presión sobre la superficie terrestre y a esta se le conoce como presión atmosférica. Esta presión es igual al peso de una columna vertical de aire de sección transversal unitaria, que actúa por encima de la superficie del planeta, extendiéndose hasta los límites exteriores de la atmósfera”.

Es máxima al nivel del mar y según se asciende, va disminuyendo. A mayor altitud menor presión atmosférica.

<sup>9</sup> Este tema es tomado del idioma inglés en donde se describe el tiempo meteorológico o atmosférico (weather) y el clima (climate).

## HUMEDAD, NUBOSIDAD Y PRECIPITACIÓN

El agua está en todo el planeta, como vapor es transparente y no lo vemos hasta que se convierte en nubes y se precipita como lluvia o hielo.

La cantidad de vapor depende de la temperatura, entre más fría menos vapor, por eso, a veces, al amanecer aparece rocío en los vidrios de los automóviles. Al paso directo de hielo a vapor de agua se le llama sublimación.

Dentro de la atmósfera hay una circulación de agua interminable, que empieza cuando el Sol evapora cientos de miles de litros de agua de los océanos. El viento transporta ese aire húmedo a otras regiones y se condensa a nubes que producirán lluvias y nevadas. A todas esas formas se les llama precipitación. Si la precipitación cae en el océano, el agua está lista para empezar de nuevo su ciclo.

En la temporada de lluvias, las nubes aparecen con muchas formas y van desde blancas hasta diferentes tonos de gris. Las nubes aparecerán siempre sobre el horizonte, en una línea llamada nivel de condensación. Así, por ejemplo, puede formarse una cumulonimbos o nube de tormenta, esa a la que hace referencia uno de los personajes de la película *Up*, de Walt Disney.

El porcentaje del cielo cubierto por nubes se evalúa como despejado cuando existe menos de 10% cubierto por nubes; medio nublado cuando de un décimo a cinco décimos el cielo está cubierto por nubes; nublado cuando existe de seis a nueve décimos de cielo cubierto, y cubierto cuando hay más de nueve décimas de nubes en el cielo.

## VISIBILIDAD

Es la mayor distancia a la cual un objeto puede ser visto e identificado como tal. Existen muchas definiciones, principalmente para fines aeronáuticos, lo importante es que en el mundo esa variable se mide cada hora en todos los aeropuertos del mundo durante las 24 horas.

## EL VIENTO

Es el movimiento horizontal del aire. Sin embargo, también tiene dirección y ésta se mide desde la cual el viento está soplando, de allí surge la rosa de los vientos con los 360 grados contemplados en una circunferencia. Por ejemplo, cuando pasa un frente frío por el Golfo de México puede originar vientos fuertes del Norte.

En el mundo existen diferentes tipos de estaciones en donde se miden todos o algunos elementos del tiempo, de-



Las nubes siempre aparecen sobre el horizonte.



El clima hace funcionar al planeta.

pendiendo de la aplicación, por ejemplo, para los vuelos se registran los valores cada hora, en una base de datos, para el trazo de rutas.

El tiempo atmosférico también es monitoreado por los satélites meteorológicos, que envían imágenes cada quince minutos, de México y todo el planeta.

El tiempo meteorológico es estudiado por la Meteorología.

### **DEFINICIÓN DEL CLIMA**

Representa la acumulación de los elementos del tiempo diarios y estacionales sobre un largo periodo de tiempo.

El clima es mucho más que promedios, normales y anomalías o desviaciones de las normales, incluye los extremos

del tiempo meteorológico, las ondas de calor del verano o las temporadas de frío en el invierno.

La frecuencia de estos extremos incluyen el océano, las superficies continentales y los ecosistemas, así como el hielo existente en los polos y en las montañas más altas.

Haciendo una analogía con el sistema circulatorio humano, el clima hace funcionar al planeta, ya que es un sistema dinámico, que distribuye la fuente de energía proveniente del Sol.

Algunos productos generados en el Servicio Meteorológico Nacional para caracterizar el clima de México son: el reporte del clima en México, la climatología de la precipitación anual y la precipitación registrada anual, además de anomalías obtenidas en porcentaje y milímetros. ❀

# CAPÍTULO 3 LA ATMÓSFERA

## COMPOSICIÓN DE LA ATMÓSFERA

La atmósfera es la capa gaseosa que rodea a la tierra y está, formada por una mezcla de elementos y combinaciones químicas: 78% nitrógeno, 21% oxígeno y 1% de gases raros, además de pequeñas partículas de anhídrido carbónico, hidrógeno, metano, subóxido de nitrógeno, ozono, dióxido de nitrógeno, iodo, cloruro sódico, amoníaco, óxido de carbono, gases nobles e impurezas (partículas de polvo, sal, productos de combustión, etcétera).

Muchas de estas sustancias ejercen gran influencia en la estabilidad del clima, en la vida y en la salud, por ejemplo, el nitrógeno está estrechamente ligado con la fertilidad de los suelos, el ozono interviene en el balance calorífico atmosférico, amortiguando la radiación que llega a la superficie de la Tierra, mientras que los núcleos de condensación, que se encuentran suspendidos en la atmósfera (impurezas), favorecen la formación de nubes y lluvia.

Además de estas sustancias, la atmósfera contiene vapor de agua, que juega un papel muy importante en la formación de nubes e hidrometeoros, y depende de la tempe-

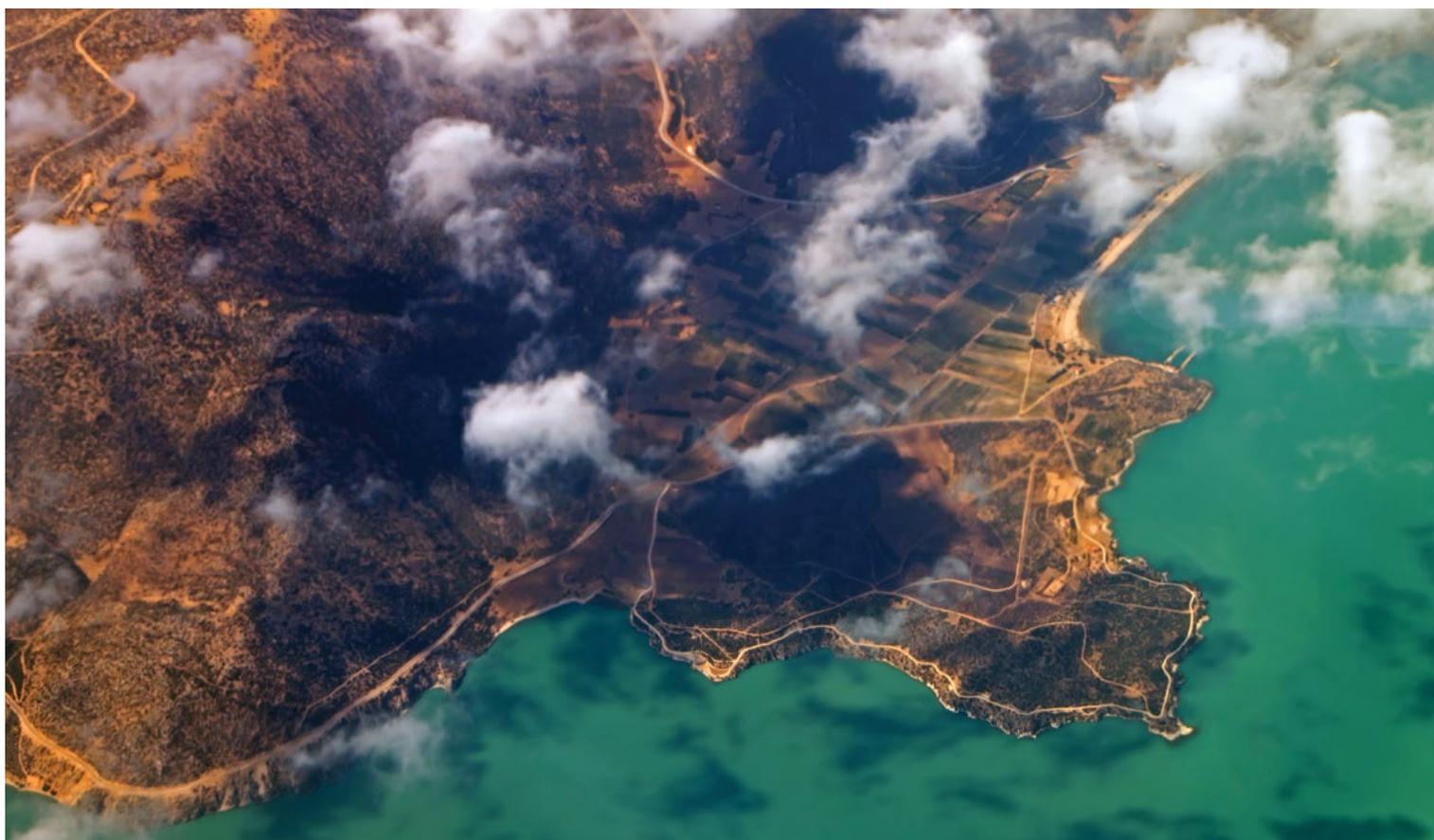
ratura del aire, ya que mientras mayor sea la temperatura, mayor será la cantidad de vapor que pueda contener.

## LA ATMÓSFERA Y SU DISTRIBUCIÓN TÉRMICA

De acuerdo con la distribución de temperatura, la atmósfera se divide en cinco grandes regiones convencionales, separadas por capas de transición.

### Regiones de la atmósfera

Región principal	Altura media (km)	Capa de transición
Tropósfera	0-13	Tropopausa
Estratósfera	13-25	Estratopausa
Mesósfera	25-80	Mesopausa
Termósfera	80-800	Termopausa
Exósfera	Más de 800	



Casi todos los fenómenos meteorológicos ocurren en la tropósfera.

La tropósfera es la primera capa de la atmósfera y se extiende desde la superficie hasta unos 13 km de altitud, sobre el Ecuador alcanza los 16 km, descendiendo en los polos entre 7 y 8 km. Esta capa varía ante los cambios de temperatura de tierras y mares, del día y la noche y de las estaciones del año.

Casi todos los fenómenos meteorológicos ocurren en la tropósfera, ya que contiene el mayor volumen de vapor de agua, la mayor concentración de núcleos de condensación y las mayores variaciones de temperatura; presentándose incluso inversiones térmicas que no atienden el patrón de comportamiento de la temperatura en esta capa.

La temperatura disminuye en la tropósfera a razón de 6.5 grados cada kilómetro, y se le conoce como gradiente vertical de temperatura.

La zona de transición entre la tropósfera y la estratósfera se llama tropopausa, y es justo en donde la disminución de la temperatura cesa, constituyendo así, el límite superior de la tropósfera.

Se le llama estratósfera a la región situada encima de la tropopausa, en ella la temperatura se mantiene casi

constante, disminuyendo la agitación del aire, y su límite superior es la estratopausa.

En esta capa se encuentra la ozonósfera, llamada así por los procesos físico-químicos que en ella se producen. Se localiza entre los 12 y 28 km de altitud y forma la capa de la alta atmósfera donde existe una gran cantidad de ozono, que permite la absorción de los efectos nocivos de la radiación, ya que funciona como una pantalla protectora.

La cantidad de ozono depende directamente de la radiación solar que llega a la estratósfera, presentando un máximo en otoño, después de recibir la mayor cantidad de radiación solar en verano y un mínimo en primavera, después de la poca radiación en invierno.

La mesósfera es la capa que comienza a partir de la estratopausa, se caracteriza por un amplio máximo de temperatura, que llega a los 0°C a unos 50 km. A ese máximo se le llama capa caliente. Su límite superior se llama mesopausa, en esta capa la temperatura alcanza valores entre -80°C y -110°C.

La termósfera es la capa que se encuentra por encima de la mesopausa, cuya característica principal es el



Aurora.

aumento continuo de la temperatura, que alcanza unos 500°C a unos 500 km. La capa de transición entre la termósfera y la exósfera se le llama termopausa.

La ionósfera es una porción de la atmósfera, que se encuentra dentro de la termósfera. Contiene una apreciable cantidad de electrones libres que afectan notablemente las ondas electromagnéticas que inciden a la superficie de la Tierra. La formación de electrones libres se debe a la luz ultravioleta emitida por el Sol y al bombardeo de partículas. Por debajo de los 60 km la concentración de electrones es nula, entre los 90 y 400 km aparecen capas mejor definidas, variando en el día y la noche.

La exósfera es la capa que puede considerarse como el límite de la atmósfera terrestre y su altura es limitada.

### FENÓMENOS ATMOSFÉRICOS

Existen diferentes tipos de fenómenos en algunas de las capas de la atmósfera, que pueden ser benéficos o dañinos para las diferentes actividades que se realizan en la tropósfera:

#### Nubes de cenizas volcánicas

Este es un fenómeno muy evidente en la atmósfera. Se origina cuando un volcán entra en erupción y arroja grandes cantidades de partículas y aerosoles, que actúan como núcleos de condensación. Este fenómeno aunque puede fungir como un toldo, impidiendo que la radiación solar llegue a la superficie de la Tierra, también conlleva un riesgo de intoxicación para las actividades al aire libre, e incluso en operaciones aéreas, ya que reduce la visibilidad.

#### Auroras

Son fenómenos electromagnéticos producidos por la ionización de las moléculas de los componentes de la alta atmósfera, que emiten energía en forma de luz. Estas auroras están directamente relacionadas con el campo magnético de la Tierra.

#### Meteoros

Son fenómenos naturales producidos por la fricción de pequeñas partículas de materia con la atmósfera,



La atmósfera es una capa de aire que rodea a la Tierra.

que pueden estar suspendidas o depositadas en alguna superficie.

### **EL SOL, LA TIERRA Y NUESTRA ATMÓSFERA, ESTACIONES DEL AÑO Y DURACIÓN**

La atmósfera es una capa de aire que rodea a la Tierra. Aproximadamente la mitad del aire, por peso, se encuentra dentro de los 5,486 m inferiores. El resto del aire se encuentra disperso dentro del campo de una distancia vertical de más de 1,609 km. No existe una frontera atmosférica exterior definida. No obstante, las partículas de aire se vuelven menos numerosas a medida que la altitud aumenta, hasta que gradualmente superan la fuerza de gravedad de la Tierra y escapan al espacio.

Las diferencias de temperatura en la superficie terrestre afectan la densidad de la atmósfera, provocando un continuo movimiento interno de aire llamado circulación. Aunque otros factores influyen en la circulación, ésta se crea principalmente por la desproporción de radiación solar entre las altitudes inferiores y las superiores. El calentamiento desigual de la Tierra y el agua por el Sol también ejerce influencia sobre la circulación.

La atmósfera es muy importante porque hace posible que la Tierra sea habitable, ya que bloquea y evita que algunos de los peligrosos rayos del Sol lleguen a ella. Atrapa el calor y regula la temperatura. Además contiene el oxígeno, que es esencial para la vida.

La Tierra realiza dos movimientos principales estrechamente relacionados con el clima y sus variaciones: el de traslación y el de rotación. El primero es el recorrido que efectúa el planeta en torno al Sol, fuente de calor que regula todo el proceso climático terrestre. Y el segundo es el movimiento que ejecuta la Tierra sobre su eje imaginario que pasa por los polos, y que define el día y la noche, con la consiguiente influencia en los procesos atmosféricos.

La órbita que describe la Tierra es un elipse ligeramente alargada, ocupando el Sol uno de los focos, aunque hay que reconocer que su excentricidad es muy pequeña. Cuando la Tierra pasa por el punto más cercano al Sol, llamado perihelio (sucede en enero), se encuentra a 147.7 millones de kilómetros del mismo, mientras que cuando se halla en el punto más alejado, llamado afelio (sucede en julio), dista 152.2 millones de kilómetros. El tiempo que tarda la Tierra en completar ese recorrido da origen al año terrestre, que es de 365 días, 5 horas, 48 minutos y 45.975 segundos.

El eje imaginario en torno del cual gira el globo terrestre no es perpendicular al plano de la órbita que describe alrededor del Sol, conocido como eclíptica, que está  $23^{\circ} 27'$  inclinado con respecto al mismo. Se debe a esta inclinación la desigualdad de los días y las noches y la sucesión de las estaciones.

### LAS ESTACIONES DEL AÑO

Se conocen como agentes externos a los factores que influyen en la atmósfera y la afectan.

El principal y más importante agente externo que afecta a la atmósfera de la Tierra es el Sol, porque aporta luz y calor al planeta, y los cambios que sufre afectan a la atmósfera terrestre.

Los rayos de luz que provienen del Sol tienen diferente incidencia en nuestro planeta, por su movimiento de traslación y debido a la inclinación del eje terrestre. Es decir, la cantidad de luz y calentamiento de la Tierra a lo largo del año es diferente, y en consecuencia también los fenómenos atmosféricos. De tal manera que sin ser meteorólogos, todos podemos deducir en qué época del año estamos y con ello inferir el tiempo que va a prevalecer.

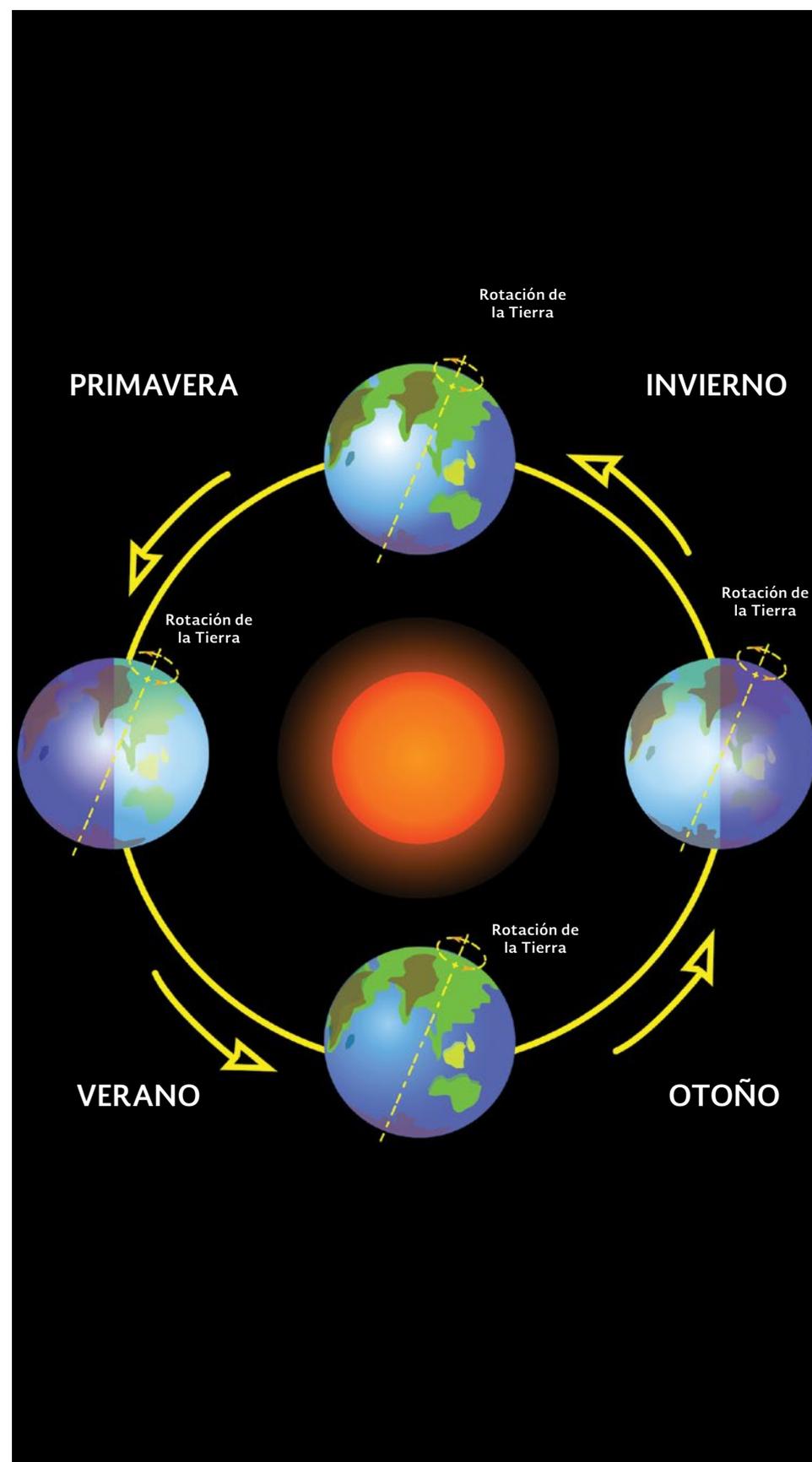
Por eso en las tiendas, cuando se acerca la primavera exhiben y venden albercas e inflables, coincidiendo también con la Semana Santa y la época de estiaje en México, poco después, cuando llegan las lluvias, hay paraguas e impermeables y junto con ello ropa vaporosa para el verano: ¡las vacaciones llegaron! Y con la venta de botas, abrigos y rompevientos, se sabrá que ha comenzado el frío.

Las estaciones del año se dan por la inclinación del eje de la Tierra, y no se producen al mismo tiempo en el hemisferio Norte (Boreal) que en el Sur (Austral); están invertidos uno con relación al otro.

Las estaciones están dadas por cuatro posiciones en la órbita del planeta: los solsticios y los equinoccios.

En los equinoccios (primavera y otoño), el eje de la Tierra es perpendicular a los rayos del Sol, que caen verticalmente sobre el Ecuador. Y en los solsticios (invierno y verano), el eje se encuentra inclinado a  $23.5^{\circ}$ , lo que provoca que los rayos solares caigan verticalmente sobre el Trópico de Cáncer, presentando el verano en el hemisferio norte y en el Trópico de Capricornio cuando es verano en el hemisferio sur.

Los equinoccios y los solsticios no son exactos, pues el planeta experimenta perturbaciones que provocan que las estaciones no comiencen el mismo día y a la misma hora.



En la Tierra intervienen dos movimientos principales: la traslación y la rotación.

Por eso es errónea la creencia de que hace calor porque la Tierra está más cerca del Sol, o que hace frío porque está más lejos. Curiosamente en el hemisferio norte cuando es invierno, el planeta está más cerca del *astro rey* y cuando es verano se encuentra más distante. Esta diferencia, sin embargo, no es tan importante para el clima del planeta.

### CICLO HIDROLÓGICO Y OROGRAFÍA DE MÉXICO

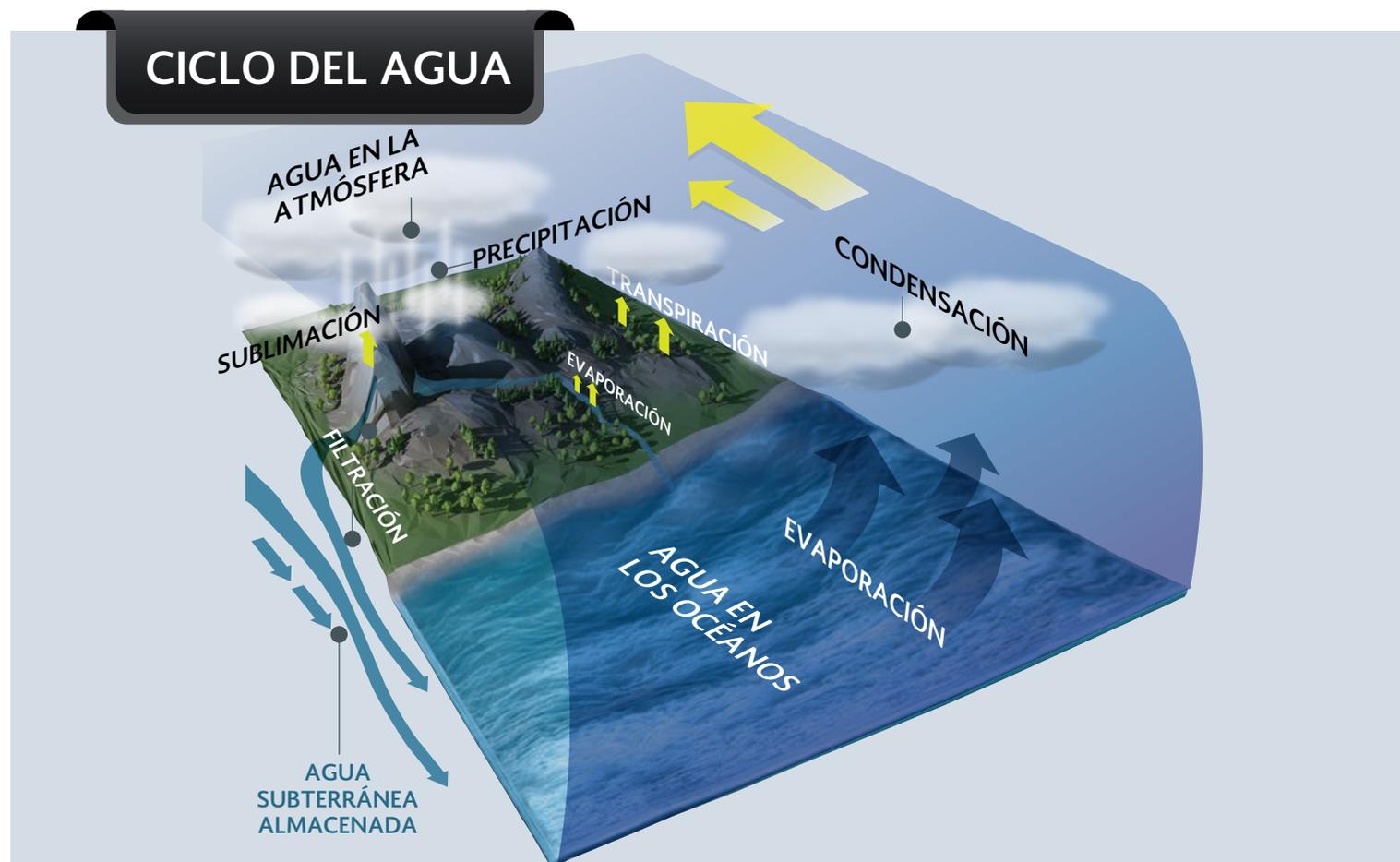
El ciclo hidrológico describe el movimiento continuo y cíclico del agua en la Tierra. La reserva principal de agua es el océano, que cubre alrededor de tres cuartas partes de la superficie terrestre y contiene más del 97%.

El agua puede cambiar su estado de líquido a vapor o hielo durante el ciclo, y los procesos pueden ocurrir en segundos o en millones de años. Aunque el equilibrio del agua en el planeta permanece relativamente constante, las moléculas individuales pueden circular muy rápido. Además, el hielo y la nieve pueden sublimar directamente en vapor de agua.

Los motores del ciclo hidrológico son la energía solar, que evapora el agua, y la gravedad, que la atrae al suelo como precipitación.

El agua que se evapora es principalmente la de los océanos. Las corrientes de aire ascendentes toman el vapor de la atmósfera, junto con el agua de evapotranspiración, procedente de las plantas y del suelo.

Al elevarse y entrar en contacto con las temperaturas más frías, el vapor se condensa en nubes, que son desplazadas alrededor del globo por las corrientes de aire. Las partículas de las nubes chocan, crecen y caen del cielo. Algunas llegan como precipitaciones de nieve y pueden acumularse como casquetes polares y glaciares, que almacenan el agua congelada durante miles de años. En climas más cálidos, los bloques de nieve a menudo se descongelan cuando llega la primavera. La mayor parte de la precipitación cae sobre los océanos, pero cuando llega a la tierra fluye sobre la superficie para formar parte de los ríos, cuya corriente moverá el agua nuevamente hacia los océanos.



Sin embargo, no toda el agua fluye por los ríos, ya que parte es filtrada y llega a las aguas subterráneas y rellena acuíferos que almacenan cantidades enormes de agua dulce durante periodos largos del tiempo. Algunas infiltraciones permanecen cerca de la superficie y pueden emerger, acabando como agua superficial u oceánica. Con el tiempo, el agua sigue fluyendo, para entrar de nuevo en el océano, donde el ciclo se renueva.

### LA OROGRAFÍA EN MÉXICO

La Orografía es la parte de la Geografía Física que describe y clasifica los tipos de relieve o elevaciones de un lugar determinado, es decir, las formas de la superficie de la Tierra.

En México, el relieve se organiza en torno a una gran meseta central: el Altiplano Mexicano y una serie de sierras y cordilleras que la rodean: la Sierra Madre Occidental, la Sierra Madre del Sur, la Sierra Madre Oriental y el Eje Volcánico Transversal, que atraviesa el país de Este a Oeste.

Las elevaciones más altas de México son volcanes y se destacan:

1. Pico de Orizaba o Citlaltépetl (5,700 m)
2. Popocatepetl (5,462 m)
3. Iztaccíhuatl (5,286 m)
4. Xinantécatl o Nevado de Toluca (4,690 m)
5. Sierra Negra o Tliltépetl o volcán Atlitzin (4,621 m)
6. Malintzin o La Malinche (4,460 m)
7. Nevado de Colima (4,240 m)
8. Cofre de Perote (4,201 m)
9. Volcán Tacaná (4,117 m)

### OROGRAFÍA Y METEOROLOGÍA

México posee un relieve tan variado que, debido al gran número de cordilleras, montañas, volcanes, sierras y valles que lo conforman, es uno de los pocos países en el mundo en donde su orografía incide directamente en el clima y gran parte de los fenómenos meteorológicos que le afectan. Las montañas influyen en la cantidad de precipitaciones, ya que el movimiento ascendente del aire, inevitable cuando se topa contra el obstáculo orográfico que supone la montaña, genera una condensación del vapor de agua y



Iztaccíhuatl.



La mayor nubosidad se encuentra en las zonas de montañas.

la posterior formación de nubes, favoreciendo con ello la presencia de lluvia.

### **NUBOSIDAD OROGRÁFICA**

Por lo general, la mayor nubosidad se encuentra en las zonas de montañas y cordilleras, ya que las mismas obstaculizan la circulación de los vientos obligándolos a ascender, por lo cual disminuyen su temperatura, condensan la humedad que transportan y forman nubes en las laderas o vertientes de barlovento (desde donde sopla el viento), y de menor altura en el lado de sotavento (hacia donde sopla el viento).

### **LLUVIA O PRECIPITACIÓN OROGRÁFICA**

Una vez que la columna de aire fue forzada a ascender tras encontrarse con algún obstáculo o barrera (como la montaña o la cordillera), la humedad condensada en nubes puede transformarse en lluvia, cuya cantidad, intensidad y duración dependerá tanto del tipo de relieve orográfico, como de la anchura o la angostura del obstáculo, la pendiente de la cuesta y la velocidad con la que asciende el viento.

### **VIENTO OROGRÁFICO**

Cuanto más escarpadas sean las cuestas y más estrechas las barreras contra las que chocan los vientos, mayor ve-

locidad alcanzarán los mismos al ascender, por lo que, a su vez, la nubosidad será mayor y las lluvias que se originan más fuertes. Por otro lado, todas las cordilleras o cadenas montañosas tienen pasos estrechos o áreas de angostura entre montañas, que hacen que los vientos tomen mucha velocidad al atravesarlas, pues el aire tiende a comprimirse produciéndose un efecto acelerador conocido como Efecto Venturi, como sucede en la zona conocida como La Ventosa, en el Istmo de Tehuantepec.

La Orografía influye tanto en la formación de nubes, como en la cantidad de precipitaciones y la velocidad del viento que se puede registrar en un lugar.

### **CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA Y LA CORRIENTE EN CHORRO**

La circulación del viento a escala global o Circulación General Atmosférica es el fenómeno que equilibra las diferencias térmicas y de presión en la Tierra. Este mecanismo de redistribución del aire es esencialmente tridimensional, y ocurre junto al suelo y en la atmósfera libre.

El aire es un fluido en continuo movimiento porque la Tierra, además de no ser homogénea, tiene traslación y rotación. Sin embargo, el viento de los polos jamás alcanzará al Ecuador y viceversa; esto se debe a que el giro del planeta

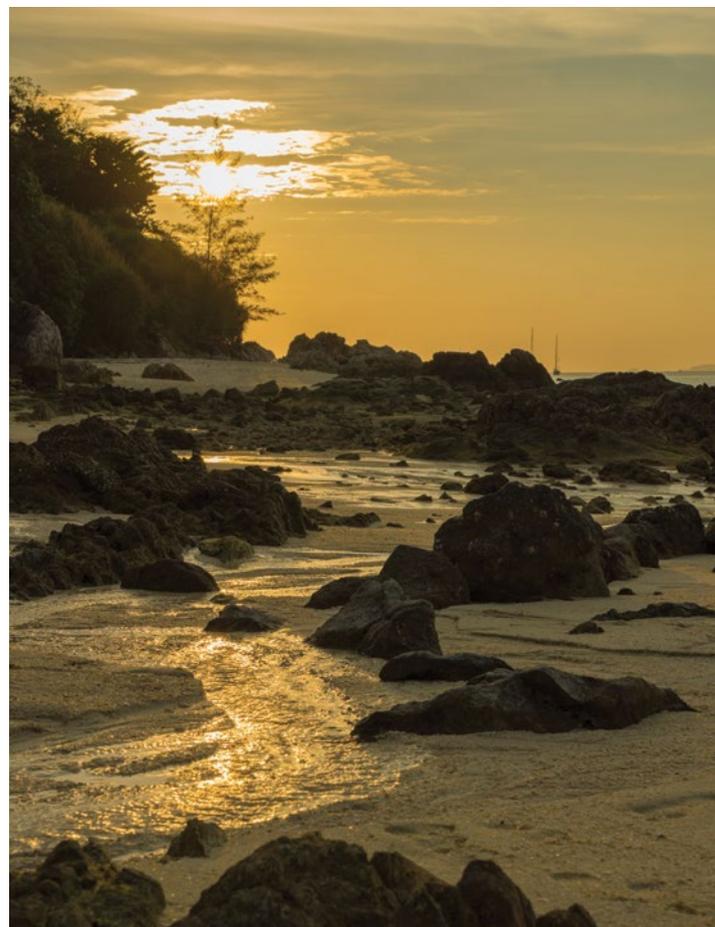
es hacia la derecha de todas la trayectorias del viento, provocando que el aire que originalmente va de Norte a Sur, por esta desviación, tenga una trayectoria de Este a Oeste.

Este fenómeno produce una acumulación de aire en la superficie, que en las proximidades de los 60° de latitud forma depresiones unidas al frente polar, que separa el aire frío del caliente, impidiendo el paso hacia el Ecuador.

A pequeña escala es posible visualizar este gradiente en las brisas terrestres y marinas. Durante el día la tierra se calienta más rápido que el mar, provocando el ascenso del aire superficial, por diferencia de densidad, en la atmósfera. Esto provoca bajas presiones relativas que facilitan la entrada de aire del mar que es más frío, es decir, las brisas marinas. Durante la noche sucede lo contrario. La tierra pierde con mayor rapidez que el mar el calor acumulado durante el día, provocando un ascenso del aire marino más cálido y, en consecuencia, bajas presiones relativas sobre el mar. El aire marino ascendente es remplazado por el de la tierra, que es más frío. Son las brisas terrestres.



La humedad condensada dependerá del relieve y de la anchura o angostura del obstáculo.

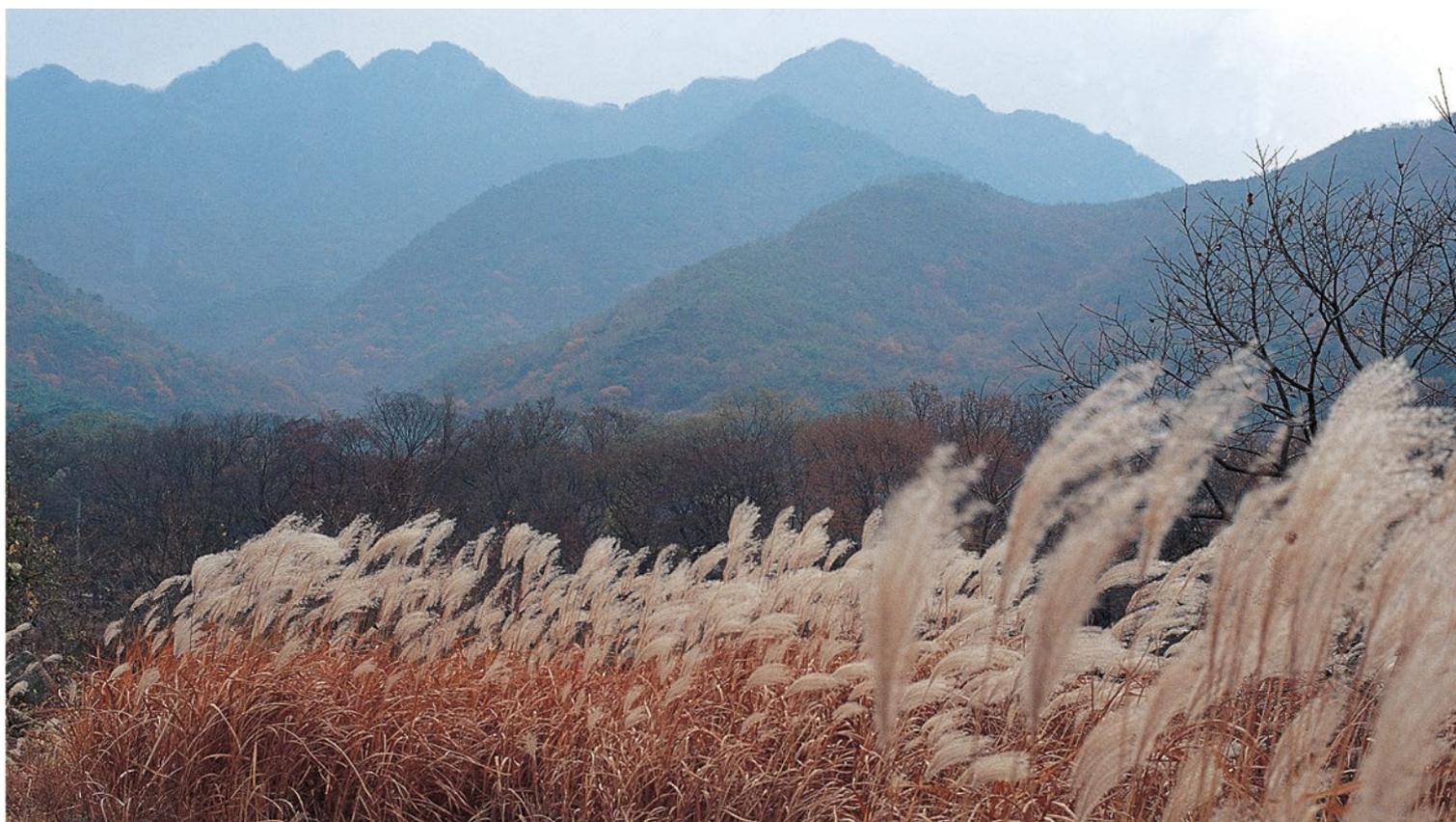


Durante el día la tierra se calienta más rápido que el mar.

A escala planetaria el fenómeno es similar, aunque mucho más complejo. En el Ecuador existe un cinturón de bajas presiones que rodea a la Tierra, denominado depresión o cinturón ecuatorial, provocado por la ascensión del aire caliente en las latitudes centrales. Al subir el aire se enfría en contacto con las capas altas de la tropósfera y pierde gran parte de la humedad que contenía, que generalmente la descarga en forma de lluvia, volviendo a descender. Este movimiento de masas de aire genera un flujo de aire o célula de convección llamada célula de Hadley.

En la parte superior de la tropósfera, la circulación atmosférica se organiza en dos grandes sistemas de vientos, uno del Oeste, en el que se incluye la corriente en chorro, y otro del Este, en latitudes ecuatoriales. Ambos están separados por anticiclones subtropicales.

Debido a la rotación de la Tierra cualquier fluido en movimiento, a lo largo de un gradiente, no es rectilíneo, porque éste experimenta una desviación provocada por la fuerza de Coriolis. En el hemisferio norte, la desviación es hacia la



Los vientos se clasifican en planetarios, regionales y locales.

derecha, mientras que en el Sur es hacia la izquierda. Y el aire, como cualquier otro fluido, experimenta esta fuerza en su movimiento.

El aire asciende en el cinturón de bajas presiones ecuatorial y vuelve a bajar en las zonas de altas presiones, y desde éstas vuelve a desplazarse hacia el Ecuador por la superficie, siguiendo el gradiente de presión, en forma de viento. Debido al efecto de las fuerzas de Coriolis, el viento sufre una desviación hacia la derecha en el hemisferio norte y a la izquierda en el sur. Estos vientos se conocen como alisios, y siempre soplan de Este a Oeste. En el hemisferio norte, debido a las grandes masas continentales, el aire que fluye desde las zonas de altas presiones hacia el Polo Norte se comporta de manera diferente.

Los vientos se clasifican en planetarios, regionales y locales. Dentro de los planetarios se encuentran los alisios, los vientos del Oeste y los del Este o polares.

En la parte superior de la tropósfera la circulación atmosférica se organiza en dos grandes sistemas de vientos: uno del Oeste, en el que se encuentra la corriente en chorro, y otro del Este, en latitudes ecuatoriales; que si se le agregan

los cinturones de altas y bajas presiones se aprecia cómo los vientos salen desde las altas para llegar a las bajas presiones.

En las bajas presiones, como en el caso del Ecuador, la convergencia de los vientos horizontales a la superficie terrestre supone un ascenso del aire a niveles superiores, formando células que luego descienden en los cinturones de altas presiones en donde el aire en movimiento diverge en superficie y luego busca los sectores de bajas presiones planetarias.

Los alisios del noreste y del sureste se encuentran en la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), que es la franja donde se da el ascenso del aire hacia el límite de la tropósfera<sup>10</sup>. En las altas presiones los vientos fluyen hacia el exterior de la espiral. En el lado Oeste de la espiral o células de altas presiones, el viento fluye hacia el Polo y es húmedo, al provenir de zonas intertropicales. En cambio, en el lado Este del espiral o célula fluyen los vientos hacia el Ecuador y es seco.

Tenemos también vientos del Este o polares, llamados ondas del Este. Son comunes en el Ártico y en el Antártico.

<sup>10</sup> Este fenómeno forma parte de la circulación general de la atmósfera, que supone que los vientos no son solo horizontales y cercanos a la superficie terrestre sino que conforman además células en altura.



Al subir el aire se enfría y al entrar en contacto con la tropósfera se descarga en forma de lluvia.

Entre los vientos regionales más importantes destacan los monzones, en el sudeste asiático, que afectan India, Bangladesh, Indonesia, Camboya, China y el sur de Japón.

La diferencia entre los vientos planetarios y los regionales es la escala, ya que estos últimos sólo se circunscriben a algunas zonas del mundo.

Las corrientes oceánicas, que son fundamentales en la circulación general atmosférica, son un flujo persistente de agua de componente principalmente horizontal y funcionan como regulador térmico de la superficie terrestre. Generalmente las corrientes oceánicas tienen movimientos circulares alrededor de las altas subtropicales. Las corrientes ecuatoriales con flujo desde el Oeste marcan el cinturón de los alisios. Al leve movimiento del agua con sentido Este sobre la zona de los vientos del Oeste, se le llama viento del Oeste.

### **CORRIENTE EN CHORRO**

La corriente en chorro es un fenómeno meteorológico definido como una rápida corriente de vientos del Oeste que se presenta en niveles altos de la atmósfera y da la vuelta al

planeta en ambos hemisferios. Tiene una velocidad mínima de 120 km/h. Los pilotos la conocen como la autopista de los aviones.

La Organización Meteorológica Mundial define a la corriente en chorro como una fuerte y estrecha corriente concentrada a lo largo de un eje casi horizontal en la alta tropósfera o en la estratósfera.

El chorro polar en ambos hemisferios se localiza entre los 30 y 70 grados de latitud en la superficie de presión de 300 a 200 hectopascales (hPa), aproximadamente entre 7.5 y 11 km de altura sobre el nivel del mar. Se forma en la región de fuertes gradientes de temperatura entre las masas de aire frío polar y las más cálidas. La diferencia de presión que ocurre en la alta tropósfera aumenta con la altura y origina vientos muy fuertes.

El chorro subtropical, que suele ser más intenso cerca de la superficie isobárica de 200 hPa y de los 30 grados de latitud, produce una fuerte cizalladura vertical del viento en la alta tropósfera. Debajo del nivel de máxima intensidad, la velocidad del viento disminuye bruscamente, de modo que en el nivel de 500 hPa el chorro subtropical es tan débil que

apenas se reconoce, forma un cinturón casi continuo alrededor de ambos hemisferios y puede alcanzar velocidades de 75 a 100 metros por segundo ( $m.s^{-1}$ ).

### **LA CORRIENTE EN CHORRO ASOCIADA CON FENÓMENOS DE ESCALA SINÓPTICA**

Cuando en latitudes medias forman ondulaciones, los fuertes gradientes de temperatura que se desarrollan a través de intervalos longitudinales cortos producen sistemas de baja presión (ciclones) y de alta presión (anticiclones).

Las corrientes en chorro causan cizalladura horizontal y vertical. Dado que la corriente en chorro suelen existir en niveles más altos que todas las nubes menos los cirrus, con frecuencia recibe el nombre de turbulencia en aire claro.

El rol del chorro africano del Este es un factor muy importante en la dinámica de las ondas tropicales del Este. Estas ondas, que se conocen mayormente como ondas tropicales u ondas del Este, son el sistema sinóptico principal que afecta a las regiones tropicales de África del Norte y el Atlántico tropical durante la estación cálida y son precursoras de los ciclones tropicales.

### **PRINCIPALES VARIABLES METEOROLÓGICAS TEMPERATURA DEL AIRE**

El concepto más elemental de temperatura es el resultado de una sensación, por ejemplo, cuando se toca un cuerpo se dice que está caliente o frío, según lo que se experimente. La temperatura de un cuerpo es la condición que determina si es apto para transmitir calor a otros o para recibirlo. En un sistema compuesto por dos cuerpos, se dice que uno de ellos tiene mayor temperatura cuando cede calor al otro.

Cuando se trata del planeta es necesario medir la temperatura del aire y del suelo a través de las estaciones meteorológicas. Para el aire se utilizan el termómetro seco y los de máxima y mínima; y para el suelo los que han sido introducidos en la tierra a diferentes profundidades, es decir, los geotermómetros.

El termómetro es el instrumento que mide la temperatura, para lograrlo utiliza un gran número de propiedades físicas de la materia, principalmente la dilatación de los sólidos, de los líquidos y de los gases, y la variación de la resistencia eléctrica en función de la temperatura.



Las ondas tropicales son precursoras de los ciclones.

Los instrumentos para medir temperaturas muy elevadas se llaman pirómetros, entre los que se encuentran los de radiación, que reaccionan a las radiaciones caloríficas que emiten los cuerpos sin tener que estar en contacto directo con aquel cuya temperatura se quiere medir.

La temperatura se identifica por una unidad de medida conocida, a nivel internacional, como las escalas de temperaturas de Celsius y Fahrenheit.

### PRESIÓN ATMOSFÉRICA

La atmósfera está constituida por millares de millones de moléculas y átomos que se agitan alrededor y encima de la superficie terrestre a grandes velocidades, chocan unos contra otros y golpean la tierra, a los seres humanos y a todos los cuerpos que encuentran, ejerciendo sobre ellos una presión permanente.

El estudio de la presión atmosférica constituye una parte fundamental de los tratados de Meteorología. En Física los científicos hacen una distinción entre fuerza y presión. La presión es la fuerza ejercida por una unidad de superficie. Las moléculas y los átomos de nitrógeno, de oxígeno y demás gases atmosféri-

cos bombardean a gran velocidad todo lo que se encuentran. La fuerza que ejercen por unidad de superficie del cuerpo se llama presión atmosférica.

Como las moléculas de aire se desplazan en todos los sentidos, ejercen su presión en todas las direcciones. Por ejemplo, si se llena un vaso con agua hasta el borde y se coloca una cartulina cubriéndolo, al voltear el líquido no se derrama porque la presión mantiene a la cartulina pegada a la boca del vaso.

En las proximidades del suelo, la presión es siempre más alta puesto que su valor es igual al peso de la columna de aire situado encima de la unidad de superficie sobre la cual se ejerce. A medida que se asciende, el número de moléculas y átomos de aire que se encuentran encima del observador disminuye y, por lo tanto, la presión atmosférica decrece cuando la altitud aumenta.

### AIRE HÚMEDO

Aunque el agua está presente en cantidades más o menos grandes en cualquier parte de la atmósfera, generalmente es invisible por encontrarse en estado de vapor. Sin embargo,



El termómetro utiliza las propiedades físicas de la materia para sus mediciones.



La mezcla de aire seco y vapor de agua se llama aire húmedo.

de vez en cuando se condensa para formar nubes. El agua entra en la atmósfera por los procesos de evaporación y de transpiración y luego cae sobre la tierra en forma de precipitación, cerrando así el ciclo hidrológico.

La mezcla de aire seco y de vapor de agua se llama aire húmedo. El aire seco está compuesto por numerosos gases y en diferentes proporciones.

#### Composición del aire

Gas	Proporción volumétrica en la atmósfera
Nitrógeno	78.084
Oxígeno	20.946
Argón	0.934
Anhídrido carbónico	0.033
Neón	0.00182
Helio	0.00052
Kriptón, hidrógeno, xenón, ozono, radón, etcétera	0.00066

#### ESTADO DEL AGUA

El agua se puede presentar en tres estados:

1. Sólido: hielo
2. Líquido: agua
3. Gaseoso: vapor

Y puede pasar directa o indirectamente de un estado a otro a través de seis procesos.

#### Estados del agua

Estado inicial	Estado final	Proceso
Hielo	Agua	Fusión
Hielo	Vapor de agua	Sublimación
Agua	Vapor de agua	Vaporización
Vapor de agua	Agua	Condensación
Vapor de agua	Hielo	Condensación sólida
Agua	Hielo	Solidificación

## HUMEDAD RELATIVA

Expresa la relación que existe entre la cantidad de vapor de agua en una masa de aire y el vapor que sería necesario para saturarla. Un aire saturado contiene, por lo tanto, el 100% de humedad relativa, mientras que uno totalmente seco (que no existe) tendría una humedad relativa de 0%. Dado que la saturación depende de la temperatura, la humedad relativa es más elevada cerca de los polos que en las regiones tropicales.

Si el aire no está saturado, la cantidad de agua contenida en la unidad de volumen es, aproximadamente, proporcional a la tensión de vapor. Por lo tanto, el valor aproximado de la humedad relativa puede determinarse con ayuda de la siguiente fórmula:

$$\text{Humedad relativa (en porcentaje)} = \frac{\text{Tensión de vapor}}{\text{Tensión de vapor saturante a la temperatura del aire}} \times 100$$

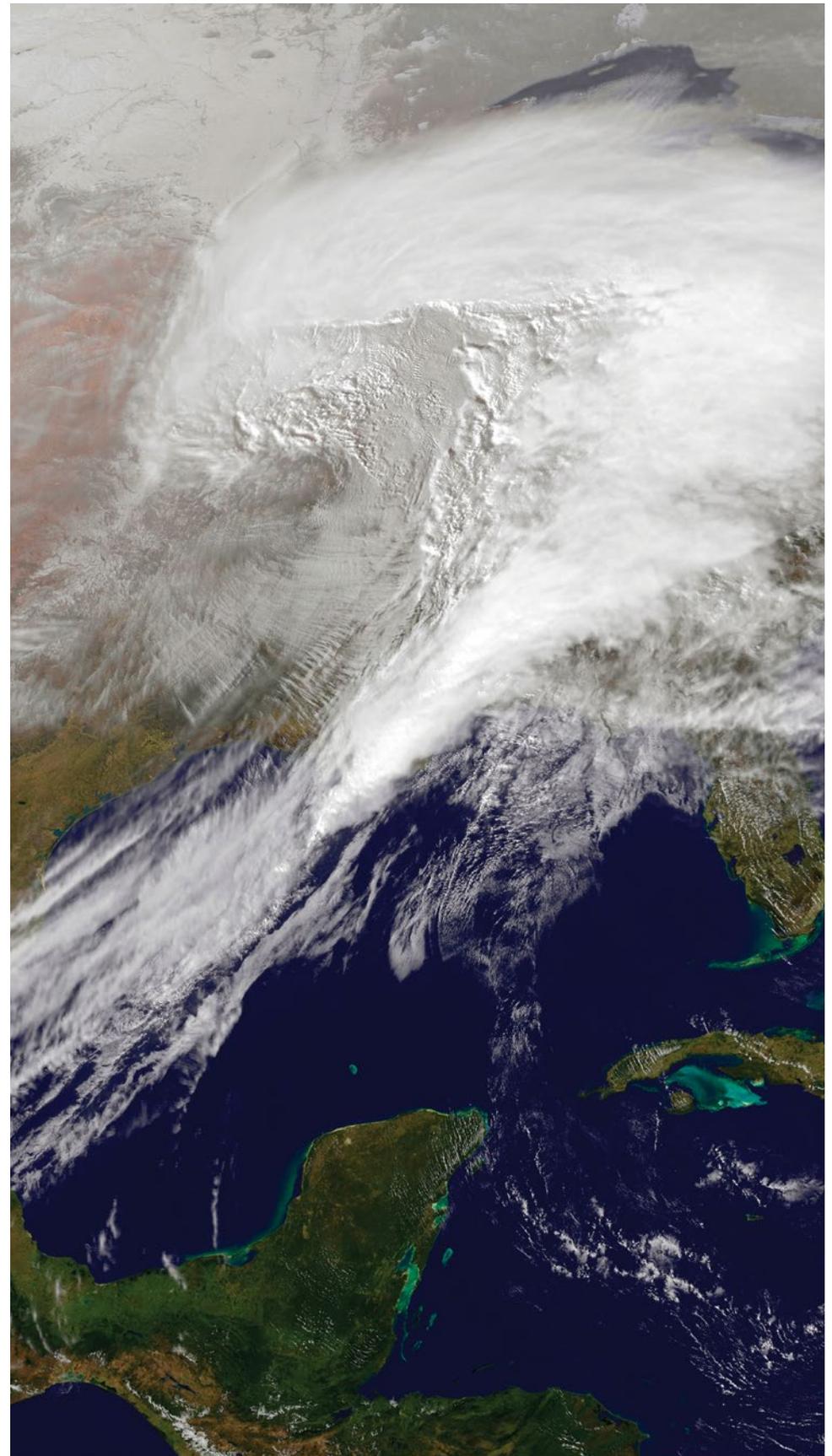
Muchas sustancias o cuerpos orgánicos reaccionan a las variaciones de la humedad relativa del aire, como el cabello humano, que se emplea para construir instrumentos para medir la humedad relativa.

La humedad relativa suele alcanzar sus valores máximos cuando amanece, ya que es entonces cuando se produce la temperatura mínima del aire. En ciertos casos, el aire puede alcanzar su temperatura de saturación. Si se produce la condensación, se pueden formar neblinas o nieblas. Más tarde, durante el día, la temperatura se eleva y disminuye la humedad relativa, lo que supone la desaparición de la niebla o de la neblina.

Los instrumentos que miden la humedad o el vapor de agua en el aire se llaman higrómetros.

Con el higrógrafo de cabellos es posible medir la humedad, ya que la longitud del cabello varía cuando la humedad relativa cambia. Estas variaciones de longitud pueden ser amplificadas por un sistema de poleas y luego transmitidas a una aguja móvil indicadora. Se puede obtener un registro continuo de la humedad relativa, reemplazando la aguja indicadora por un brazo provisto de una pluma con tinta que marca las variaciones de temperatura sobre un diagrama arrollado a un cilindro que se mueve con movimiento de rotación uniforme.

Otro método sencillo, pero preciso, para medir la humedad es utilizar el psicrómetro. Este instrumento se compone



Vista aérea de formación de nubosidad.

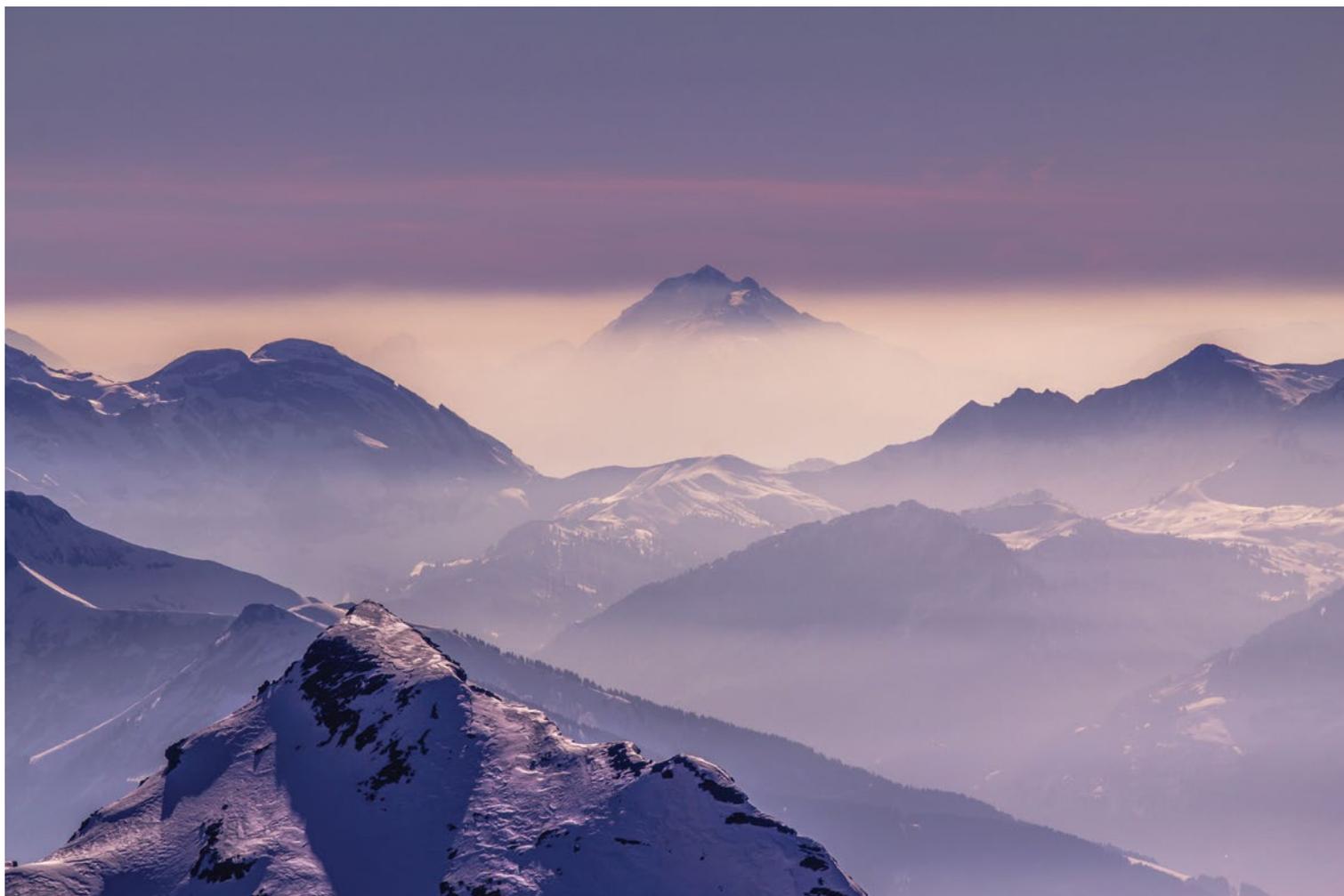
esencialmente de dos termómetros, colocados uno al lado del otro; uno de ellos mide la temperatura del aire y el otro la humedad. Algunas veces el psicrómetro se llama higrómetro de termómetro seco y de termómetro húmedo. Ambos son idénticos, pero su depósito está rodeado de una fina muselina de algodón que se mantiene húmeda con la ayuda de una mecha formada por algunos hilos del mismo material de bastante espesor, trenzados, cuyo extremidad está introducida en un pequeño recipiente de agua destilada.

### VIENTO EN SUPERFICIE

Una parte de la energía de radiación solar que llega a la Tierra se transforma en energía cinética de los gases de la atmósfera, cuyas moléculas están siempre en movimiento. En Meteorología, el viento es un movimiento del aire cerca de la superficie terrestre o en altitud. El movimiento del aire raramente es regular. Normalmente es turbulen-

to, con torbellinos de forma y dimensiones variadas, que se desarrollan en el aire y perturban su flujo. El efecto de la turbulencia cerca de la superficie terrestre es la producción de variaciones rápidas e irregulares de la velocidad y de la dirección del viento. Estas fluctuaciones de frecuencia elevada son independientes unas de otras.

A veces es difícil medir la velocidad y dirección del viento en superficie con exactitud, ya que el movimiento del aire es perturbado por numerosos factores como la rugosidad del suelo, la naturaleza de la superficie, las fuentes de calor, la presencia de edificios, etcétera. Además, por regla general, la velocidad aumenta con la altura sobre la superficie terrestre. En consecuencia, para obtener medidas comparables en lugares diferentes, es preciso adoptar una altura para la medida del viento en superficie. La dirección del viento se define como aquella de donde sopla. Se expresa en grados, contados en el sentido de las



Si se produce condensación se pueden formar neblinas o nieblas.

agujas del reloj a partir del Norte geográfico o utilizando los rumbos de la rosa de los vientos. Sin embargo, para los mensajes cifrados, la dirección del viento debe expresarse en la escala 00-36. La tabla da las cifras de la clave y su equivalente exacto en grados correspondientes a los 32 rumbos de la rosa de los vientos.

Para las observaciones sinópticas hay que determinar la dirección media del viento durante el intervalo de los 10 minutos anteriores a la hora de la observación. Es conveniente para ello utilizar una veleta registradora.

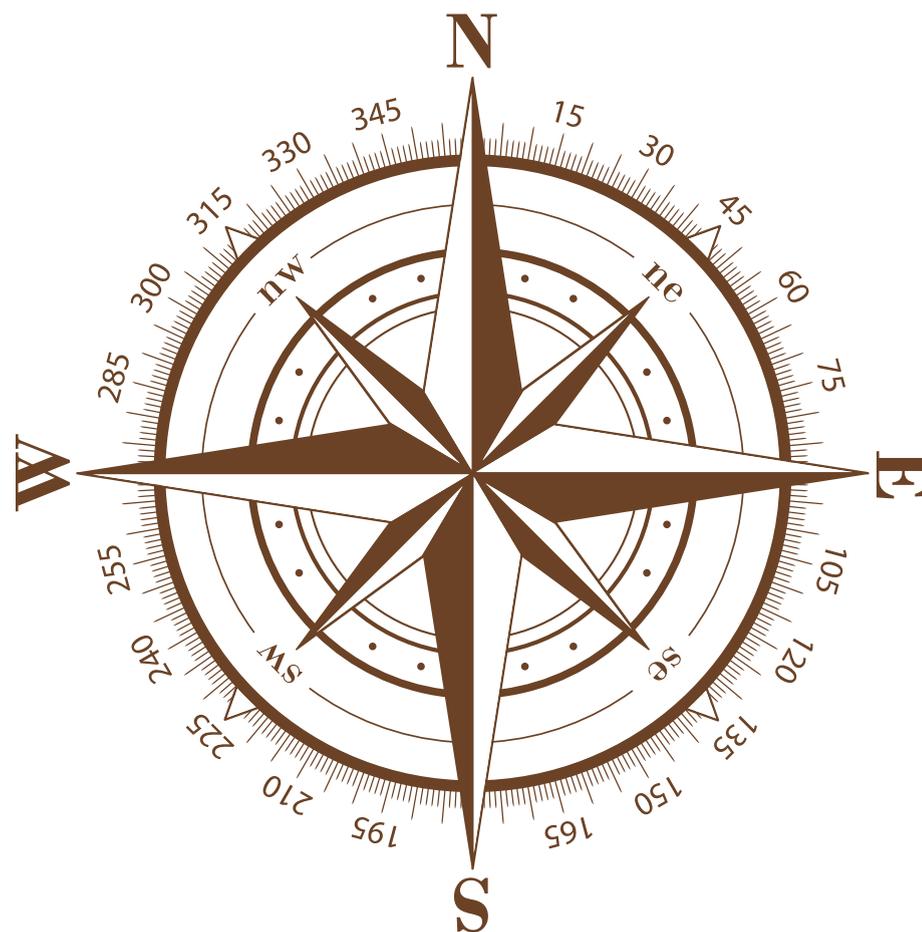
La velocidad, es decir la distancia recorrida por una partícula de aire en la unidad de tiempo, se expresa en metros por segundo (m/s) o kilómetros por hora (km/h).

Se ha convenido que hay calma cuando la velocidad del viento es inferior a un nudo.

La velocidad del viento se puede medir de distintas maneras. La más sencilla es la observación directa del efec-

to en la superficie terrestre sin utilizar instrumentos. La escala Beaufort, establecido en 1905 por el almirante sir Francis Beaufort con objeto de estimar la velocidad del viento en el mar, ha sido adoptada para ser utilizada en tierra. Después se le añadieron equivalencias en velocidad del viento para cada clase de efectos observados. Con este fin se utiliza la escala Beaufort la cual sirve para evaluar la velocidad del viento con base en las características observadas.

Otros instrumentos para medir la velocidad y dirección del viento son los anemómetros, de entre los que se destaca el de cazoletas. Este instrumento lleva normalmente tres cazoletas montadas en soportes a igual distancia y perpendiculares al eje vertical. Posee un mecanismo parecido a los contadores kilométricos de los automóviles que permite determinar el recorrido del viento en un intervalo de tiempo dado.



Rosa de los vientos.

# LA ESTRUCTURA DINÁMICA DE LA ATMÓSFERA

## LA CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA

El aire se mueve a fin de equilibrar los desbalances de presión causados por el calentamiento diferencial de la superficie terrestre. A medida que se traslada de las zonas de alta presión a las de baja presión, el viento es influido significativamente por la presencia o ausencia de la fricción. Por consiguiente, los vientos superficiales se comportan de manera diferente que los vientos en altura debido a las fuerzas de fricción que actúan cerca de la superficie terrestre.

El movimiento del aire ayuda a evitar que las concentraciones de los contaminantes liberados al aire alcancen niveles peligrosos.

### Circulación

La rotación de la Tierra modifica la circulación atmosférica pero no la produce, ya que, esencialmente, la atmósfera rota con el planeta.



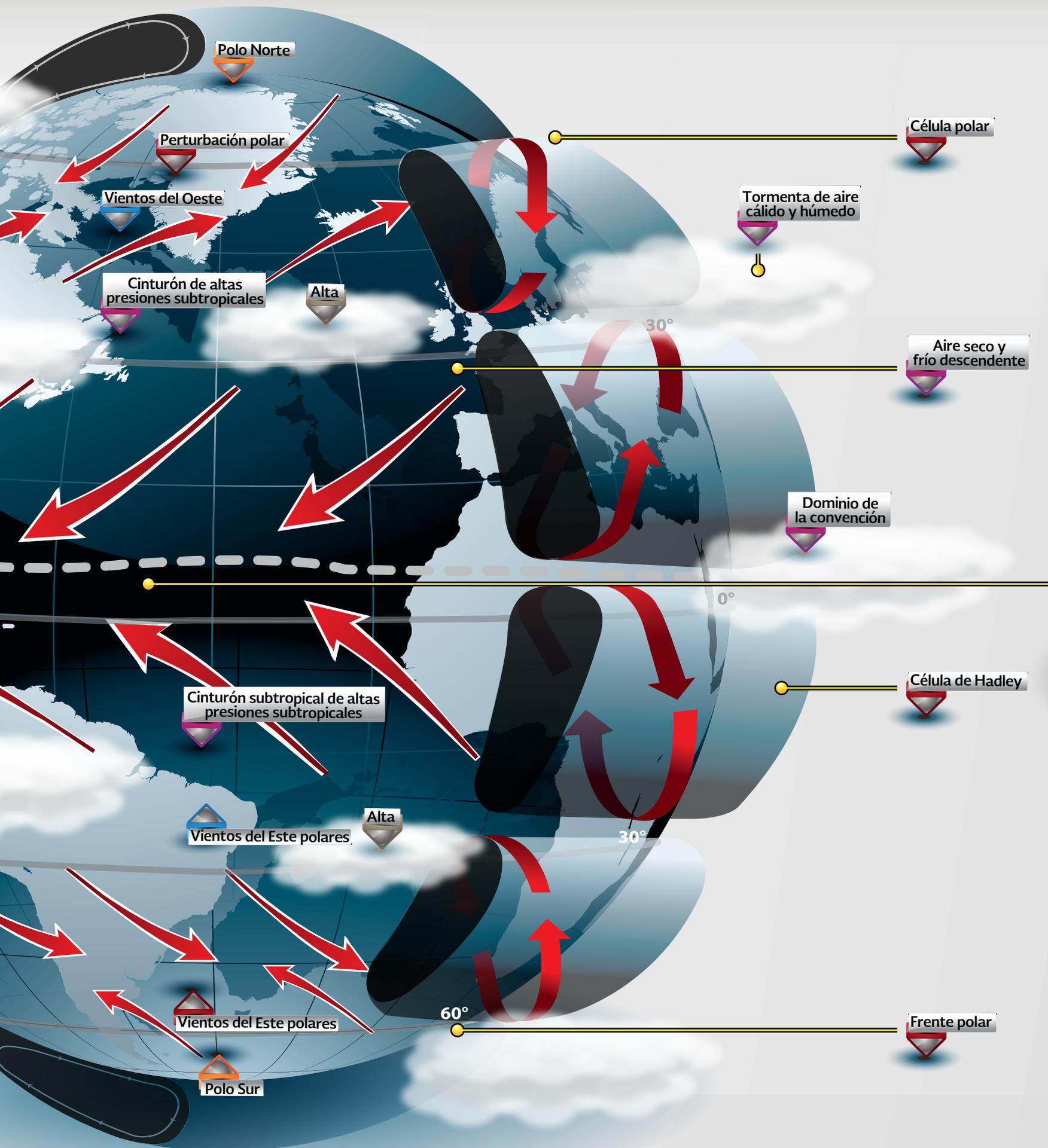
Célula polar

Depresión ecuatorial

Alta

Alta





### Sistemas

En la parte superior de la tropósfera, la circulación atmosférica se organiza en dos grandes sistemas de vientos: uno de vientos del Oeste, en el que se incluye la corriente en chorro, y otro de vientos del Este, en latitudes ecuatoriales. Ambos están separados por anticiclones subtropicales.

Escala Beaufort

Fuerza Beaufort	Nombre	Equivalencia de la velocidad a una altura tipo de 10 m sobre terreno llano o descubierto				Características para la estimación de la velocidad en tierra
		Nudos	Metros/segundo	km/h	Mph	
0	Calma	1	0-0.2	2	1	El humo sube verticalmente.
1	Ventolina	1-3	0.3-1.5	1-5	1-3	La dirección del viento se revela por el movimiento del humo, pero no por las veletas.
2	Brisa muy débil	4-7	1.6-3.3	6-11	4-7	El viento se percibe en el rostro; la hojas se agitan; la veleta se mueve.
3	Brisa débil	8-12	3.4-5.4	12-19	8-12	El viento despliega banderolas.
4	Brisa moderada	13-18	5.5-7.9	20-28	13-18	El viento levanta polvo y hojitas de papel; ramitas agitadas.
5	Brisa fresca	19-24	8.0-10.7	29-38	19-24	Los arbustos con hojas se balancean, se forman olitas con cresta en las aguas interiores (estanques).
6	Viento fresco	25-31	10.8-13.8	39-49	25-31	Las grandes ramas se agitan, los hilos telegráficos silban, el uso del paraguas se hace difícil.
7	Viento fuerte	32-38	13.9-17.1	50-61	32-38	La marcha en contra del viento es penosa.
8	Viento duro	39-46	17.2-20.7	62-74	39-46	El viento rompe las ramas, es imposible la marcha contra el viento.
9	Viento muy duro	47-54	20.8-24.4	75-88	47-54	El viento ocasiona ligeros daños en las viviendas (arranca cañerías, chimeneas, tejados).
10	Temporal	55-63	24.5-28.4	89-102	55-63	Raro en los continentes; árboles arrancados; importantes daños en las viviendas.
11	Borrasca	64-72	28.5-32.6	103-117	64-72	Observado muy raramente; acompañado de extensos destrozos.
12	Huracán	73 o más	32.7 o más	118-o más	73 o más	Estragos graves y extensos.

## RADIACIÓN SOLAR

La enorme cantidad de energía contenida en la atmósfera se manifiesta claramente durante los temporales. También se exterioriza en las grandes corrientes de aire que barren los continentes y los océanos. Prácticamente toda esta energía proviene del Sol en forma de radiación electromagnética. Hasta 99% de la energía de la radiación es transportada en banda de longitudes de onda comprendidas entre 0.15 y 4.0 micras. De esta radiación, 9%, aproximadamente, pertenece a la luz ultravioleta, 45% al espectro visible y 46% al infrarrojo. Por esto, algunas veces se dice que la radiación solar es una radiación de onda corta. Hasta 43% de la radiación de onda corta emitida por el Sol, es absorbida realmente por la superficie del globo. El resto por la atmósfera o reflejado y difundido por el suelo y la atmósfera. El

ozono contenido en la atmósfera absorbe la mayor parte de la radiación ultravioleta. El único gas que absorbe la radiación visible en cantidades importantes es el vapor de agua. Pero también la toman en cantidades variables, las nubes y los polvos, según las condiciones del momento. Cuando hay nubes, sus cimas pueden reflejar gran parte de la radiación solar que, de esta forma, es devuelta al espacio. La radiación solar puede ser dispersada en todas las direcciones por los gases y las partículas contenidas en la atmósfera. Una parte de esta radiación difundida es por lo tanto, devuelta al espacio, mientras que otra parte se transmite a la superficie de la Tierra y se llama radiación difusa. En consecuencia, la radiación total que llega a la superficie del globo es la suma de la radiación directa y de la difusa. Esta suma se llama radiación solar global. ✨



La radiación solar puede ser dispersada en todas las direcciones.





## CAPÍTULO 4 LAS NUBES Y LOS FENÓMENOS METEOROLÓGICOS

### NUBES: TIPOS Y GÉNEROS

En el ir y venir de la vida diaria, cuando levantamos la mirada al cielo, podemos apreciarlo despejado o con nubes a grandes alturas: algunas oscuras, otras blancas, o bien finas o en forma de ganchos, hongos o con apariencia de empedrado o cielo aborregado, o esas nubes grises y caóticas que avisan la aproximación de algún tipo de precipitaciones.

Al observar las nubes podemos darnos una idea de lo que va a ocurrir en las condiciones meteorológicas a corto y mediano plazo, ya sea que se presenten lluvias fuertes, ligeras, relámpagos, truenos y hasta granizo.

La actual clasificación de las nubes se remonta a finales del siglo XVIII, denominado El Siglo de las Luces, cuando Luke Howard, un intelectual con inquietudes por la Botánica, la Química y la Meteorología, en 1802 sienta las bases cuando presenta su trabajo *Sobre las modificaciones de la nubes*.

Howard identificó un número relativamente pequeño de tipos básicos y utilizó el latín para denominarlos, lo que facilitó su interpretación y adopción internacional, prevaleciendo hasta la fecha.

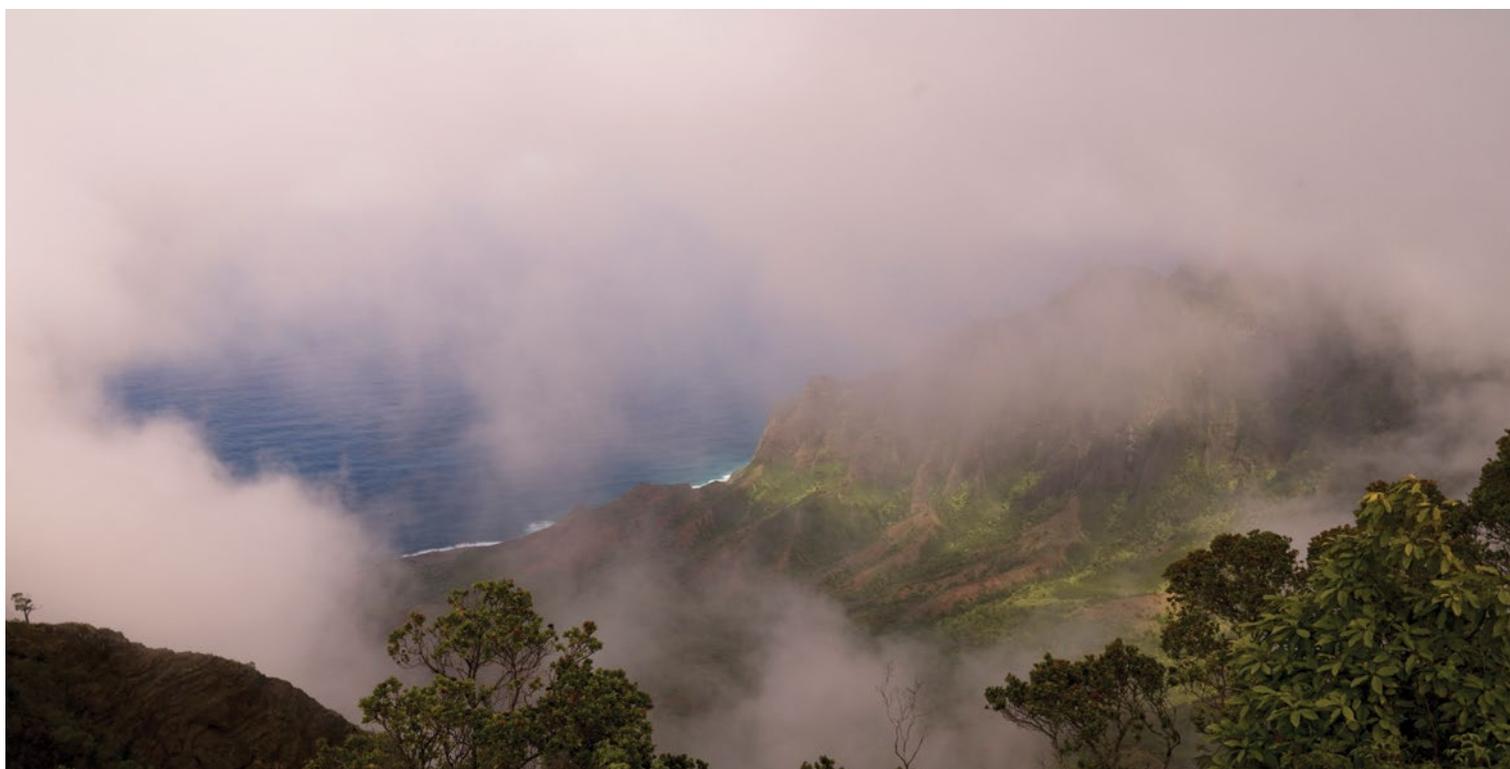
El agua está en constante transformación y su ciclo atraviesa por tres fases: evaporación, condensación y precipitación.

Para la formación de una nube principalmente interviene la condensación.

Las nubes están formadas por gotitas de agua, por cristales de hielo, o por ambas. Contrario a la creencia, no sólo están formadas por vapor de agua.

Las gotitas se forman sobre partículas microscópicas denominadas núcleos de condensación cuyos diámetros varían, los más pequeños provienen generalmente de procesos de combustión; mientras que los de mayor tamaño corresponden a partículas de sal generadas en el rompimiento de las olas en los océanos o en polvo levantado por el viento.

Para alcanzar el tamaño de una gota de lluvia de 1 mm, las gotitas deben aumentar su masa en más de un millón de veces mediante el proceso de colisión, también llamado coalescencia o choque de gotitas con gotas más grandes que las une después del impacto. A las nubes que se forman bajo estas condiciones se les conoce como cálidas, y en su interior la temperatura es superior a los 0°C.



En las nubes frías (normalmente nubes altas) se registran temperaturas inferiores a los 0° C.

Para que esta transformación sea eficiente es necesario que haya una distribución no homogénea en el tamaño de las gotitas que conforman la nube. Esta condición no se cumple en las nubes bajas de tipo estratos, en las que no existen condiciones favorables para el desarrollo de precipitación.

En las nubes frías se registran temperaturas inferiores a los 0°C, y el agua coexiste en sus tres fases: como vapor de agua, como pequeñas gotitas de agua líquida sobre-enfriada y como pequeños cristales de hielo; estos últimos crecen mediante un mecanismo similar a la condensación pero en él, ocurre un cambio directo de la etapa de vapor de agua al estado sólido. También se da un proceso como el de la coalescencia en el cual los cristales atrapan pequeñas gotas de agua sobre-enfriada, que se congela al contacto.

## **NUBE**

Es un conjunto de gotas de agua muy pequeñas, cristales de hielo o una mezcla de ambos, que tienen su base por encima de la superficie terrestre.

La formación de la mayor parte de las nubes resulta de movimientos ascendentes de aire húmedo que se expande

a causa de la disminución de la presión con la altitud o altura y, por lo consiguiente, el enfriamiento que este ascenso origina, entonces, una parte del vapor de agua se condensa para formar la nube.

Cuando el vapor de agua en la atmósfera cambia de estado, se condensa en gotitas o en partículas de hielo, que ya son visibles, formando algunas veces nubes blancas a grandes altitudes y otras veces, por el contrario, nubes bajas grises u oscuras que cubren grandes extensiones.

El tiempo depende mucho del tipo de nubes que se formen en el cielo y por eso, los meteorólogos se interesan por su estudio y evolución.

## **ALTURA, ALTITUD Y DIMENSIÓN VERTICAL**

De acuerdo al diccionario de la Real Academia Española, las palabras altura y altitud tienen el mismo significado, sin embargo, en el medio aeronáutico no son sinónimos.

Se hace mención del medio aeronáutico en virtud de que los tipos de nube influyen en la planeación de los vuelos, particularmente en las aeronaves pequeñas.

Es a menudo importante precisar el nivel en el que están situadas ciertas partes de una nube y para indicar tal nivel, pueden utilizarse los conceptos de altura y de altitud.

La altura de un punto, por ejemplo la base de una nube, es la distancia vertical entre el nivel del lugar de observación y el nivel de ese punto, que se puede localizar sobre una colina o una montaña.

La altitud de un punto es la distancia vertical entre el nivel del mar y el de ese punto, base de una nube o vuelo de una aeronave. Los observadores de superficie utilizan en general el concepto de altura.

Los observadores de aeronáuticos, se refieren generalmente a la altitud.

Los valores de altura y altitud únicamente coincidirán cuando un avión vuele sobre el mar, que sería lo mismo si nos refiriéramos a la altura o altitud de una nube siempre y cuando la observación se haga desde la superficie marina.

La dimensión vertical de una nube es la distancia vertical entre el nivel de su base y el de su cima.

### CLASIFICACIÓN DE LAS NUBES

Existen diez tipos principales denominados géneros, subdivididos en especies y variedades:

1. Cirrus
2. Cirrocúmulos
3. Cirrostratos
4. Altocúmulos
5. Altostratos
6. Nimbostratos
7. Stratocumulus
8. Stratus
9. Cúmulos
10. Cumulonimbos

Y de acuerdo al nivel o piso en que se forman se clasifican en altas, medias y bajas:

Las altas están constituidas por cristales de hielo. En las regiones tropicales las bases de estas nubes se encuentran entre 6 y 18 km; en las regiones templadas entre 5 y 13 km, y en las regiones polares entre 3 y 8 km. Son ejemplo de este tipo los cirrus, cirrocúmulos y cirrostratos.

Las medias están constituidas por cristales de hielo y gotas de agua. Las bases de estas nubes en las regiones



Cirrus.



Cirrocúmulos.



Cirrostratos.

tropicales se encuentran entre 2 y 8 km, en las regiones templadas (latitudes medias) entre 2 y 7 km y en las regiones polares se encuentran entre 2 y 4 km. Las nubes medias son altocúmulos, altostratos y nimbostratos.

Las bajas están compuestas por gotitas líquidas. Son estratocúmulos, estratos, cúmulos y cumulonimbos; las dos últimas alcanzan a menudo los niveles medios y altos. Las bases de las nubes bajas se encuentran desde la superficie del globo terrestre hasta 2 km en las tres regiones consideradas: tropical, templada (latitudes medias) y polar.

### UNIDADES Y ESCALAS

La unidad de medición de la altura de las nubes es el metro, o para algunas aplicaciones aeronáuticas el pie. La unidad de nubosidad es la octa. De acuerdo a la *Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos*, de la Organización Meteorológica Mundial de 1996, la octa se define como la octava parte de la bóveda celeste cubierta por una nube.

### DEFINICIÓN DE LOS DIEZ TIPOS DE NUBES

Las definiciones y las abreviaturas adoptadas son:

#### 1. Cirrus (Ci)

Nubes separadas en forma de filamentos blancos y delicados, o de franjas estrechas, blancas. Estas nubes están compuestas de cristales de hielo. Cuando están en bancos, su espesor puede ocultar el Sol. Son siempre de color blanco cuando el Sol está suficientemente alto en el cielo.

#### 2. Cirrocúmulos (Cc)

Forman una capa casi continua con aspecto de una superficie con arrugas finas y formas redondeadas como pequeños copos de algodón. Son totalmente blancas, no presentan sombras. Estas nubes están constituidas por cristales de hielo, aunque pueden contener gotitas de agua que rápidamente se transforman en cristales de hielo. Son señales de corrientes en chorro y turbulencia.

#### 3. Cirrostratos (Cs)

Velo nuboso transparente y blanquecino de aspecto fibroso, como de cabello o liso, que cubre el cielo total o parcialmente, por lo general no ocasiona precipitación y produce fenómenos de halo solar o lunar. Esta nube está constituida principalmente por cristales de hielo. Sucede a veces que el

velo de cirrostratos es tan tenue que el halo constituye el único indicio de su presencia.

#### 4. Altocúmulos (Ac)

Banco, manto o capa de nubes blancas o grises, o a la vez blancas y grises, que tienen generalmente sombras propias, compuestas de losetas, guijarros, rodillos, etcétera, de aspecto a veces parcialmente fibroso o difuso, unidos o no. Estas nubes están constituidas en su mayor parte por gotitas de agua subfundidas. En sus partes delgadas se puede observar una corona o irisaciones. En expresión popular sería la nube que da aspecto de “cielo empedrado”.

#### 5. Altostratos (As)

Manto o capa nubosa grisácea o azulada de aspecto estriado, fibroso o uniforme, que cubre total o parcialmente el cielo y que presenta partes muy delgadas para dejar ver el Sol, al menos de manera tenue, como a través de un vidrio deslustrado. El altostratos no da lugar a fenómenos de halo, pero sí ocasiona lluvia menor y continua, está constituido por gotitas de agua y cristales de hielo.

#### 6. Nimbostratos (Ns)

Capa nubosa gris, a menudo sombría, cuyo aspecto resulta velado por las precipitaciones más o menos continuas de lluvia o de nieve, las cuales en la mayoría de los casos llegan al suelo. El espesor de estas capas es en toda su extensión suficiente para ocultar completamente el Sol. Esta nube está constituida por gotitas de agua, por cristales de hielo o por una mezcla de estas partículas líquidas y sólidas. Se le conoce como cielo aborregado. Producen precipitación intermitente y algunas veces intensa.

#### 7. Stratocumulus (Sc)

Banco, manto o capa de nubes grises o blanquecinas, o ambos colores a la vez, que tienen casi siempre partes oscuras, compuestas de losas, guijarros o rodillos, tienen aspecto no fibroso (salvo el caso de “virga”). Estas nubes están sobre todo compuestas por gotitas de agua. Dentro de este tipo los aviones experimentan cierta turbulencia.

#### 8. Stratus (St)

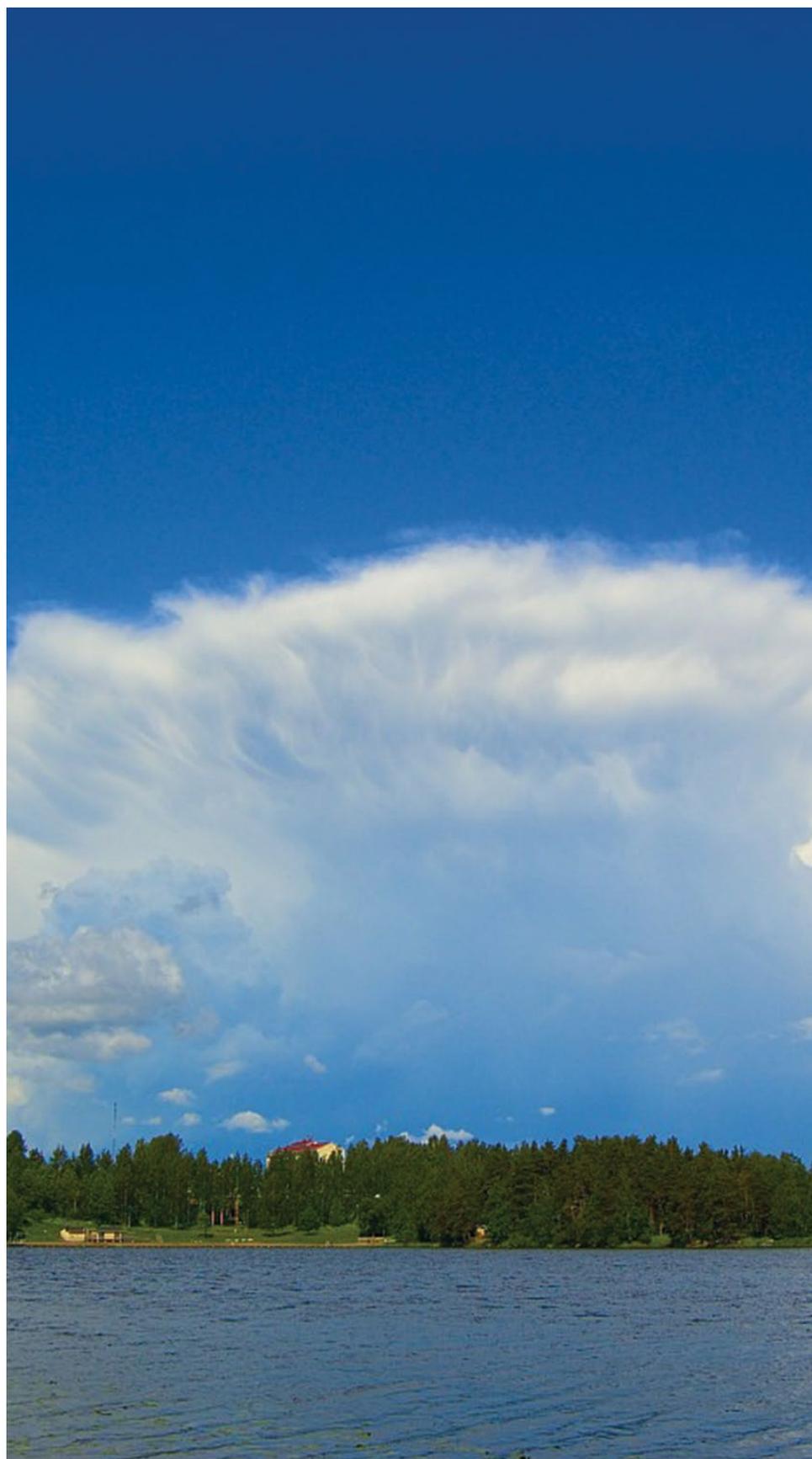
Capa nubosa generalmente gris de base bastante uniforme, que puede dar lugar a llovizna, prismas de hielo o cinarra.



Nimbostratos.



Stratocumulus.



Cumulonimbos.

Cuando el Sol es visible a través de esta capa, su borde se ve claramente recortado. A veces el stratus se presenta en forma de bancos desgarrados. La niebla y la neblina son básicamente un stratus posado en tierra. Cuando esta niebla o neblina se desprende del suelo se convierte en una nube del tipo o género stratus. No produce fenómenos de halo salvo en algunas ocasiones a muy bajas temperaturas. Aparecen con frecuencia por las mañanas sobre zonas montañosas. Genera lloviznas.

### 9. Cúmulos (Cu)

Nubes separadas, por lo general densas y de contorno bien recortado, que se desarrollan verticalmente en forma de protuberancias, de cúpulas o de torres, cuya región superior grumosa parece como una coliflor. Las partes de estas nubes iluminadas por el Sol son a menudo de una blancura brillante; su base es horizontal y un tanto oscura. Los cúmulos están a veces desgarrados. Son muy frecuentes sobre la tierra durante el día, y sobre el agua por las noches; pueden ser de origen orográfico o térmico (convectivas) y dan lugar a precipitaciones en forma de aguaceros.

### 10. Cumulonimbos (cb)

Nube densa y potente, de gran dimensión vertical, tiene forma de montaña o de enormes torres. Una parte de su región superior es por lo general lisa, fibrosa o estriada y casi siempre aplastada; esta parte se extiende a menudo en forma de yunque o de amplio penacho. Los cumulonimbos están constituidos por gotitas de agua y, principalmente en su región superior por cristales de hielo. Contiene también gruesas gotas de agua, cristales de hielo granulado y a menudo copos de nieve. Son las nubes que originan las tormentas, tornados, lluvia fuerte y granizo, acompañadas de relámpagos y truenos. La base de la nube cumulonimbo se encuentra entre 700 y 1,500 metros, y los toques o la parte superior de la nube entre 24 y 35 km de altura. Este tipo de nubes acumulan gran cantidad de energía y los vientos que se desarrollan dentro de ellas pueden llegar a alcanzar los 200 km por hora. Para el medio aeronáutico, esta nube es muy peligrosa, ya que genera una gran turbulencia a su alrededor, y puede provocar que una aeronave se desplome o que su estructura sufra daños si llega a cruzarla, motivo por el cual los aviones las evitan.

### CURIOSIDADES DE LA METEOROLOGÍA

#### ¿Por qué el cielo es azul?

Si nos ubicáramos a 40 km sobre la superficie de la Tierra, veríamos el cielo totalmente negro; cuando la luz del Sol (que es blanca) atraviesa la atmósfera, las moléculas en el aire –principalmente las de nitrógeno– dispersan la luz del azul al final del espectro visible.

El cielo es azul porque las moléculas de la atmósfera constituyen pequeños obstáculos materiales que esparcen la luz en todas las direcciones, fenómeno al que llamamos difusión molecular de Rayleigh. Siendo la luz violeta más difundida que la luz roja, la luz que nos viene del cielo, y no del Sol, es más rica en color violeta, mientras que la proporción de los otros colores es pequeña. Esta es la razón por la cual el cielo aparece azul.

#### ¿Por qué las nubes son blancas?

Porque las moléculas que dispersa la luz azul son más pequeñas que las gotas de agua que forman las nubes. La luz del Sol es difundida por las gotitas de agua y entonces se origina una completa escala de blancos y tonos grises. Si

una nube es muy densa, la luz no la atraviesa del todo, lo que da lugar a bases oscuras.

#### ¿Por qué las nubes adquieren otros colores?

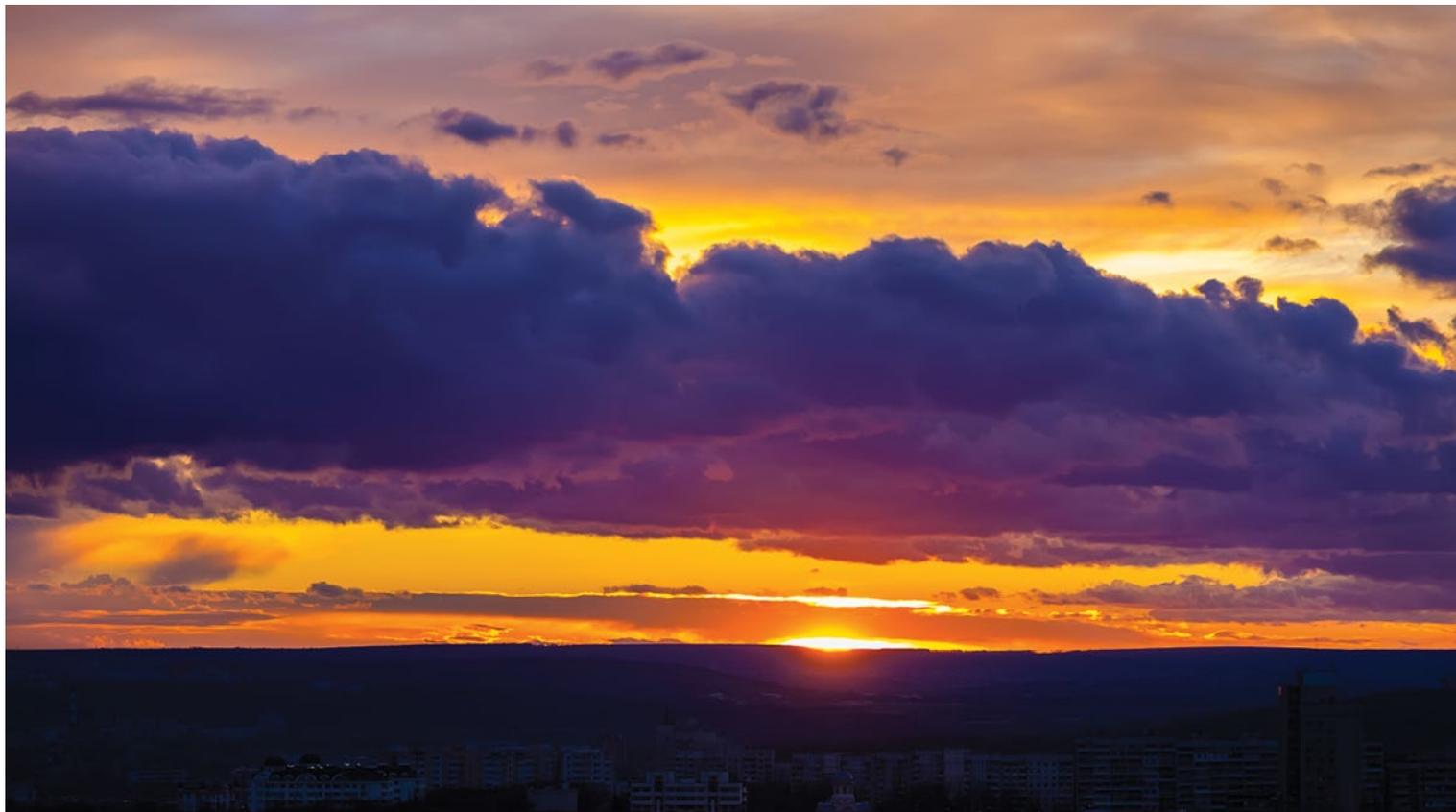
Por la tarde, las nubes adquieren colores rojos y naranjas debido a la absorción de azul en la gruesa capa atmosférica que los rayos de luz tienen que atravesar en los momentos crepusculares. Pero las nubes también pueden adquirir otras tonalidades cuando la luz que difunden no proviene directamente del Sol, sino del reflejo del mar o de la tierra.

Los esquimales utilizan este método para saber dónde hay agua para navegar con sus canoas durante el deshielo del Ártico. Las nubes que están sobre el agua en vez de sobre el hielo adquieren una ligera coloración verdosa, como resultado, del reflejo del agua.

### HIDROMETEOROS

Para comprender qué son los hidrometeoros, empezaremos por saber qué es un meteoro.

En la Meteorología un meteoro es un fenómeno que es observado en la atmósfera o en la superficie terrestre.



Las nubes adquieren colores y tonalidades cuando la luz que difunden no proviene directamente del Sol.



La niebla y la neblina están formadas por pequeñas gotas de agua.

Puede consistir en precipitación de agua líquida o sólida; o una manifestación de naturaleza óptica o eléctrica.

Los meteoros tienen diversas características. Tomando en cuenta la naturaleza de las partículas que los constituyen y los procesos físicos que originan su formación, se pueden clasificar en hidrometeoros, litometeoros, fotometeoros y electrometeoros.

### Hidrometeoros

Son partículas de agua sólidas o líquidas que caen o se encuentran suspendidas en la atmósfera, o bien son levantadas del suelo por el viento o depositadas sobre el suelo o en la libre atmósfera.

Clasificación de los hidrometeoros:

1. La caída de gotas o gotitas de agua que se forman principalmente en las nubes como lluvia, llovizna, nieve, cinarra y prismas de hielo.
2. Gotas de agua que se evaporan antes de alcanzar la superficie terrestre (virga).

3. Pequeñas gotitas de agua que se encuentran en suspensión en el aire, como la niebla y la neblina, que se producen en la proximidad de la superficie terrestre o en su contacto.
4. Las partículas de agua sólidas o líquidas que son levantadas de la superficie por el viento y sólo se observan en las capas inferiores de la atmósfera.
5. Los depósitos de gotitas de agua sobre los cuerpos de forma líquida o sólida.

La palabra precipitación se emplea para designar una caída de gotas o gotitas de agua que alcanzan finalmente la superficie terrestre. La intensidad de la precipitación se expresa con los términos ligera, moderada y fuerte.

Los hidrometeoros pueden producirse en forma de chubascos o bien de forma más o menos uniforme (intermitente o continua). No se deben confundir las lluvias intermitentes con los chubascos.

Los chubascos empiezan y terminan repentinamente, por lo general tienen variaciones rápidas y algunas veces

violentas, las gotas de agua y las partículas sólidas que caen durante el tiempo que dura un chubasco son más gruesas que las que caen en las otras precipitaciones.

### TIPOS DE HIDROMETEOROS

**Lluvia.** Es la precipitación de partículas de agua líquida pequeñas, pero muy dispersas.

**Lluvia engelante.** Sus gotas se congelan cuando impactan con el suelo, con los objetos de la superficie del globo o con los aviones en vuelo.

**Llovizna.** Precipitación bastante uniforme, constituida exclusivamente por minúsculas gotas de agua, muy próximas unas a otras.

**Nieve.** Precipitación de cristales de hielo. Los cristales se unen entre sí formando copos. Para que se registre la caída de nieve es necesario que la temperatura del aire se encuentre por debajo de los cero grados Celsius.

**Nieve Granulada.** Precipitación de gránulos de hielo, blancos y opacos. Estos son esféricos o a veces cónicos. Cuando caen sobre un suelo duro rebotan y a menudo se rompen. Se producen cuando la temperatura en superficie es próxima a 0°C y se presentan por lo general en forma de chubascos, mezclados con copos de nieve o con gotas de lluvia.

**Cinarra.** Precipitación de muy pequeños gránulos de hielo, blancos y opacos. Estos son relativamente aplastados o alargados. Cuando golpean un suelo duro rebotan, pero no se rompen.

**Hielo granulado.** Precipitación de gránulos de hielo, transparentes o translúcidos, de forma esférica o irregular, raramente cónica. Generalmente rebotan cuando golpean un suelo duro y se puede oír el ruido de su impacto. Pueden subdividirse en dos tipos principales:

1. Gotas de lluvia congeladas o copos de nieve fundidos casi del todo y que se han congelado de nuevo. La congelación se produce en la proximidad del suelo.



Paisaje nevado.

2. Gránulos de nieve envueltos en una fina capa de hielo, que se forma por congelación de gotas interceptadas por los gránulos o del agua resultante de una fusión parcial de los mismos.

**Granizo.** Precipitación de glóbulos o trozos de hielo (pedrisco) que caen ya sea separados o aglomerados en bloques irregulares. Constituidos casi exclusivamente por hielo transparente o por una serie de capas de hielo transparente. Las granizadas se observan por lo regular durante fuertes tormentas.

**Prismas de hielo.** Caída de cristales de hielo que tienen la forma de agujas, de columnas o de placas, son tan tenues que parecen suspendidas en la atmósfera. Este hidrometeoro es frecuente en las regiones polares y se observa con temperaturas muy bajas.

**Niebla.** Suspensión en la atmósfera de gotas muy pequeñas de agua, que reducen la visibilidad horizontal sobre la superficie a menos de 1 km. Tiene el aspecto de un velo blanquecino que recubre el paisaje. Cuando en la atmósfera existen en suspensión numerosos y minúsculos cristales de hielo que reducen la visibilidad en la superficie del globo se



Granizo.

denomina niebla helada. A menudo estos cristales relucen con los rayos solares. Esta niebla puede dar lugar a fenómenos ópticos como columna luminosa, halo, etcétera.

**Neblina.** Suspensión en la atmósfera de gotas microscópicas de agua que reducen la visibilidad a más de 1 km, tiene un aspecto en forma de un velo grisáceo o azulado, generalmente poco denso, que recubre el paisaje.

La diferencia entre niebla y neblina es la densidad de las partículas que se expresa en términos de visibilidad: si el fenómeno meteorológico da una visión de 1 km o menos es considerado como niebla, y si reduce la visibilidad más de 1 km es considerada neblina. Vista a la distancia la neblina es más blanquecina, mientras que la niebla es grisácea o azulada.

**Ventisca.** Conjunto de partículas de nieve levantada del suelo por un viento bastante fuerte y turbulento:

1. Ventisca baja. Conjunto de partículas de nieve levantadas por el viento hasta poca altura sobre el suelo.
2. Ventisca alta. Conjunto de partículas de nieve levantadas del suelo por el viento a gran altura.

**Rociones.** Conjunto de gotas de agua arrancadas por el viento en la superficie de una gran extensión de agua generalmente en las crestas de las olas y transportadas a poca distancia en la atmósfera. Cuando la superficie del agua está muy agitada, las gotas pueden ir acompañadas de espuma.

**Rocío.** Depósito de gotas de agua que se condensan sobre los objetos del suelo o cerca del suelo. Éste se forma cuando:

1. La superficie de los objetos se enfría por debajo de la temperatura del medio ambiente. Dicho enfriamiento se debe habitualmente a la irradiación nocturna y el rocío se deposita sobre los objetos del suelo o cerca del suelo.
2. El aire caliente y húmedo entra en contacto con una superficie más fría, cuya temperatura es inferior a la del punto de rocío del aire; se genera un proceso de advección.

**Rocío blanco.** Consiste en gotas de rocío blanco congeladas.

**Escarcha.** Es un depósito de hielo de aspecto cristalino, la mayoría de las veces en forma de escamas, plumas o de abanicos. Se forma con temperaturas inferiores a 0°C.

**Cencellada blanca.** Se forma por la congelación rápida de gotas muy pequeñas de agua que no se han unido del todo, está constituida por gránulos más o menos separados. La cencellada se deposita sobre los objetos, principalmente so-

bre sus superficies expuestas al viento y en particular, sobre sus partes puntiagudas. En la atmósfera libre puede depositarse sobre las partes de las aeronaves expuestas al viento.

**Cencellada transparente o hielo liso.** Depósito de hielo, por lo general homogéneo y transparente, que proviene de la congelación de gotas de llovizna o de gotas de lluvia, sobre los cuerpos cuya superficie está a una temperatura inferior a 0°C.

**Tromba.** Torbellino de viento intenso, cuya presencia se manifiesta por una columna nubosa o un cono nuboso invertido en forma de embudo, que sale de la base de una nube cumulonimbos y por una “cepa” constituida por gotas de agua levantadas de la superficie del mar o por polvo, arena o diferentes residuos del suelo. El movimiento del torbellino es rápido y casi siempre en sentido ciclónico. Es posible observar varias trombas bajo una misma nube. Las trombas (tornados) provocan daños muy importantes, a su paso puede hacerse sentir sobre una zona cuyo ancho alcanza hasta 5 km y su longitud es de varias centenas de kilómetros.

### ELECTROMETEOROS

Es una representación visible o audible de la electricidad que se encuentra en la atmósfera. Los más representativos son:

**Tormentas.** Consisten en una o varias descargas bruscas de electricidad atmosférica. Se manifiestan por el destello breve e intenso (relámpago) y por un ruido seco y estruendoso (trueno). La mayoría de las veces van acompañadas de precipitaciones en forma de chubascos de lluvia, nieve, nieve granulada, hielo granulada o granizo.

**Relámpagos.** Son un destello de luz derivado de una descarga eléctrica repentina la cual toma lugar en el interior de una nube, sobre estructuras elevadas en la tierra o desde las montañas, pueden ser relámpagos de Nube a Tierra (ocurren de una nube a tierra), en la Nube (tiene lugar dentro de la nube), de Nube a Nube (se extiende de una nube a otra) y de Nube al Aire (de una nube al aire, pero no llega al suelo).

**Fuego de San Telmo.** Es una descarga eléctrica luminosa, más o menos continua y de intensidad débil o moderada, que se origina ya sea de objetos elevados situados en la superficie del globo (pararrayos) o bien en las aeronaves en vuelo (extremos de las alas, hélices, etcétera). Se manifiesta normalmente en forma de penachos o crestas violetas y/o verdosas visibles por la noche.



Aurora polar.

**Aurora polar.** Es un fenómeno luminoso de la alta atmósfera que aparece en forma de arcos, bandas o cortinas. Son originadas por la presencia de partículas cargadas de electricidad emitidas por el Sol durante las erupciones cromosféricas y que actúan sobre los gases de la atmósfera alta. Las auroras polares son, en la mayoría de los casos, blancas con tinte verdoso o amarillo verdoso, en algunas ocasiones pueden ser amarillo verdosas en toda la extensión, excepto en franjas inferiores rojas.

### FOTOMETEOROS

Es un fenómeno luminoso producido por la reflexión, refracción, difracción o interferencia de la luz del Sol o de la Luna.

Los fotometeoros pueden ser observados:

1. En una atmósfera más o menos clara. Espejismo, vibración, centelleo, rayo verde y tintes crepusculares.
2. En la superficie o en el seno de las nubes. Fenómenos de halo, corona, irisaciones y corona de Ulloa.

3. En la superficie o en el seno de ciertos hidrometeoros o litometeoros. Corona de Ulloa, arco iris, arco iris blanco, anillo de Bishop y rayos crepusculares.

Los fotometeoros, también llamados fenómenos ópticos, son:

**Halo.** Constituye un grupo de fenómenos ópticos que tienen la forma de anillos, arcos, columnas o focos luminosos engendrados por la refracción o la reflexión de la luz a través de cristales de hielo en suspensión en la atmósfera (nubes cirriformes, niebla helada, etcétera). Cuando se deben a la refracción de la luz solar, estos fenómenos pueden presentar ciertas coloraciones, sin embargo, son siempre blancos cuando son generados por la iluminación de la Luna. El fenómeno de halo más corriente es el anillo luminoso que se ve alrededor del Sol o de la Luna.

**Parhelio.** Cuando se observan dos grandes resplandores luminosos al lado del Sol no es un asunto paranormal, es simplemente un parhelio, un fenómeno óptico, representado por dos grandes arcos que se forman a ambos lados del Sol, y es causado por la refracción de la luz. Se forma cuando hay nubes cirrus —con aspecto de copos de algodón—, en su interior contienen partículas de hielo que actúan como pequeños prismas y al ser refractados por la luz del Sol forman al parhelio. En ocasiones parecieran pequeños fragmentos de arco iris, pero no se deben confundir con éste, pues los parhelios aparecen junto al Sol, mientras que el arco iris aparece en el cielo, de lado opuesto al astro. No siempre tienen la misma forma, a veces se ven como si fuera un Sol tras las nubes, aunque menos brillante, y otras aparecen como otros soles alrededor, es por eso que en los países de habla inglesa se le conoce como *sun dog* (perros del Sol). En latín *parhelio* significa junto al Sol o compañeros del Sol.

Es un fenómeno óptico que por lo común antecede a los frentes fríos, aproximadamente 24 horas de la llegada de un sistema frontal se forman pequeñas nubes altas o nubes cirrus y en la parte trasera viene el gran descenso de la temperatura. Es normal que empiecen a aparecer hacia finales de septiembre en el hemisferio norte y son más comunes en diciembre, enero y parte de febrero.

En México este fenómeno es menos frecuente debido a que el aire frío que llega de los polos no es tan intenso como en países de Europa, Asia o Norteamérica, sin embargo, ha



Parhelio.



Color del Sol.



Arco iris.

sido visible en especial en la mañana o el amanecer, y los más espectaculares son los que se representan al medio día.

También hay parhelio lunar, fenómeno óptico que ocurre cuando se refleja la luz lunar en las nubes y se representa como puntos brillantes en un gran halo luminoso que envuelve a este satélite natural. Al igual que el parhelio solar es la antesala de un sistema frontal, que trae consigo aire frío profundo que forman una nube cirrus y un parhelio lunar, también conocido como perros de la luna o paraselene.

**Corona.** Es un anillo luminoso alrededor del Sol o de la Luna formado por la difracción de la luz sobre las gotas de agua. Su tamaño es menor que el del halo. En la corona pueden ser visibles todos los colores espectrales, pero siempre con el rojo hacia la parte exterior del anillo. En ocasiones los colores espectrales o parte de ellos se repiten varias veces o están distribuidos en forma irregular, a este efecto se le llama iridiscencia.

**Arco iris.** Es un fotometeoro que se produce por la refracción, difracción y reflexión de los rayos solares en las gotas de agua suspendidas en la atmósfera, aparece sobre el horizonte como un arco luminoso y del lado opuesto al Sol, está compuesto por todos los colores del espectro luminoso (rojo, naranja, amarillo, verde, azul, añil y violeta). Es visible cuando el Sol brilla a través del aire que contiene las gotas de agua y esto ocurre durante o inmediatamente después de la lluvia. Con frecuencia se forma un arco iris secundario con los colores invertidos y con menor luminosidad.

**Arcos supernumerarios.** Se deben a fenómenos de interferencia, sus radios son un poco más pequeños que los del arco iris principal, al que acompañan y por eso están situados en su interior y raramente pasan de dos.

**Color del Sol.** La atmósfera no difunde más que una parte relativamente pequeña de los rayos azules, que son emitidos por el Sol, el cual conserva su color blanco en la mayor parte de sus posiciones. Cuando la altura del sol sobre el horizonte es pequeña (a su salida y puesta), el trayecto de los rayos luminosos es más largo y la atmósfera difunde mayor cantidad de radiación azul, tomando entonces el astro color amarillento e incluso rojizo.

**Color de la Luna.** El satélite refleja la luz de color blanco del Sol, aunque a veces presenta un color verdoso o azulado, esto se debe a la difracción de la luz por las nubes de polvo o de humo, cuyas partículas son relativamente homogéneas.

## LITOMETEOROS

Se llama así a los fenómenos meteorológicos formados por partículas sólidas en su mayoría y no acuosas. Se pueden presentar en las formas siguientes:

1. Partículas más o menos en suspensión en la atmósfera: calima, calima de arena y humo.
2. Partículas levantadas del suelo por el viento: nube de polvo, nube de arena, tempestad de polvo, tempestad de arena, remolino de polvo y remolino de arena.
3. Ceniza volcánica. Finas partículas de polvo de roca que son expulsadas de un volcán y que pueden permanecer suspendidas en la atmósfera por largos periodos de tiempo,

produciendo puestas del sol rojizas y modificaciones climáticas a cientos de miles de kilómetros.

**Humo.** Es una suspensión en el aire de partículas pequeñas producto de la combustión. Este fenómeno puede presentarse cerca de la superficie terrestre o en la atmósfera libre. A la salida y puesta del Sol, el disco solar aparece muy rojo y cuando está alto tiene una tonalidad anaranjada o rojiza. El humo a distancia generalmente tiene una apariencia grisácea o azulada. Puede ocurrir que haya una transición a bruma cuando las partículas viajan grandes distancias y las partículas más grandes se depositan, y las que permanezcan en la atmósfera llegan a



Tempestad de arena.

estar esparcidas. Cuando el humo está cerca se distingue fácilmente por su olor. Y cuando las partículas de humo se han desplazado a gran distancia (de 40 a 60 km) y las partículas más pesadas han tocado la superficie pueden cambiar de consistencia y se llaman bruma.

**Polvo extendido.** Son partículas minúsculas de materia orgánica, tierra, arena, etcétera, que dan una apariencia grisácea o cobriza al cielo. El disco solar aparece pálido o incoloro, a veces con un matiz amarillo durante todo el día

**Tempestad de arena.** Conjunto de partículas de arena levantadas con violencia del suelo por un viento fuerte y turbulento hasta grandes alturas.

**Calima o bruma.** Es una suspensión en el aire de partículas secas, muy pequeñas, invisibles a simple vista y en número suficiente para dar al aire un aspecto opalescente. Este fenómeno semeja un velo uniforme que cubre el paisaje y domina a todos los colores. Los objetos oscuros vistos a través de este velo, tienden a adquirir un tinte azulado, mientras que los objetos brillantes, como el sol o luces distantes tienden a adquirir un color amarillo sucio o un tinte rojizo.

Cuando la bruma está presente y el Sol se encuentra muy arriba del horizonte, su luz puede tener un peculiar tinte plateado. Las partículas de bruma pueden estar compuestas de una variedad de sustancias como polvo, sal, residuos de fuegos



Bruma.



Smog.

distantes o cenizas volcánicas, polen etcétera. Las partículas generalmente están bien difundidas a través de la atmósfera.

**Remolinos o tolvaneras de polvo/arena.** Un torbellino pequeño, vigoroso, usualmente de corta duración que se hace visible por el polvo levantado del suelo

**Tolvanera.** Se produce cuando el viento levanta, desde la superficie, grandes cantidades de polvo en nubes o mantos. En estas condiciones, el viento puede ser capaz de levantar el polvo hasta alturas considerables por arriba de 2 m (6 ft), reduciendo la visibilidad horizontal a 7 millas o menos.

**Tormenta de arena.** Arena levantada por el viento a alturas moderadas por arriba de 2 m (6 ft) sobre el suelo, reduciendo la visibilidad horizontal a 7 millas o menos.

**Tormenta de polvo.** Igual que la tolvanera, excepto que la visibilidad es reducida a 5/8 de milla (1,000 m) o menos pero no menor de 5/16 de milla (500 m).

**Smog.** Acrónimo de las palabras *smoke* y *fog* (humo y niebla). Se forma por la combinación de la niebla con el humo. Adjetivo común para la contaminación. ❄️



## CAPÍTULO 5 FENÓMENOS EXTREMOS DE TIEMPO SEVERO Y SUS EFECTOS EN MÉXICO

### CICLONES TROPICALES

El ciclón tropical es un remolino de agua y viento con un centro de baja presión rodeado por bandas nubosas en forma de espiral que giran a su alrededor, en sentido contrario a las manecillas del reloj en el hemisferio Norte y en sentido opuesto en el Sur. Es un fenómeno resultante de la interacción Océano-Atmósfera que puede cubrir miles de kilómetros cuadrados y su fuerza es considerada como una de las potencialmente más peligrosas y destructivas.

#### Formación

Los ciclones tropicales se generan durante un proceso de intercambio de energía entre el mar y la atmósfera en zonas donde existen condiciones favorables para su formación, como pueden ser la temperatura superficial del mar superior a 27°C; un patrón de vientos encontrados, como el que caracteriza a los vientos alisios provenientes de los hemisferios Norte y Sur hacia el Ecuador, que al encontrarse dan lugar a la formación ocasional de centros de baja presión, hacia donde fluye el viento de la zona circundante, creando

una estructura con entrada de aire cálido en niveles bajos y salida en los superiores. En este mecanismo es determinante la fuerza de rotación de la Tierra, pues ayuda en la convergencia y movimiento circular del aire, formándose así el sistema rotatorio que da origen al ciclón tropical.

#### Estructura

El cuerpo de un ciclón tropical se va formando paulatinamente a medida que adquiere mayor fuerza, hasta llegar a la etapa de madurez. Se pueden identificar tres elementos en su estructura:

**Ojo del huracán.** Es un área de calma relativa en el centro de un huracán, que se extiende desde la base del sistema hasta los niveles altos de la atmósfera. No presenta nubes debido a que dominan los movimientos descendentes de aire, sin embargo, está rodeado por una gruesa pared de nubes de tormenta, que son las generadoras de las más grandes precipitaciones.

**Pared del ojo del huracán.** Es el área que rodea al ojo del huracán constituida por una densa pared de nubes de tormenta, donde se generan los vientos más intensos y tornados, además de ser la de mayor contenido de humedad. El ojo y la pared son los que diferencian al huracán de una tormenta tropical, la cual no desarrolla un ojo y sus vientos son menos intensos.

**Bandas nubosas.** Las bandas de nubes de las tormentas y huracanes pueden extenderse cientos de kilómetros del centro. Estas densas bandas de nubes de tormenta en espiral, que giran en sentido opuesto al de las agujas del reloj en el hemisferio Norte y al contrario en el hemisferio Sur, varían en tamaño de acuerdo con la extensión del ciclón, pudiendo alcanzar cientos de kilómetros de longitud. Por ejemplo, las bandas de lluvia del huracán *Andrew* (1992) sólo se exten-

dían a 160 km del ojo, en tanto que las del huracán *Gilbert* (1988) se extendían a más de 800 km.

### Etapas

Las tres principales etapas que se pueden presentar durante la evolución de un ciclón son depresión tropical (etapa de formación), tormenta tropical (etapa de desarrollo) y huracán (etapa de intensificación), aunque a veces esta secuencia se puede interrumpir en la primera o segunda etapa, sin haber alcanzado la siguiente.

### Depresión tropical

Etapa de transición de una zona de inestabilidad o perturbación atmosférica a la formación de un sistema ciclónico donde la circulación del viento es rotatoria. Aumenta la cantidad



Las bandas de nubes de tormentas y huracanes pueden extenderse cientos de kilómetros.

de nubes y disminuye la presión atmosférica. Puede alcanzar vientos máximos sostenidos de hasta 63 km/h. En esta etapa de formación, el ciclón todavía no tiene nombre, sin embargo, una depresión tropical en proceso de degradación, después de ser tormenta tropical con nombre o incluso huracán, mantiene el nombre asignado en etapa de tormenta.

### Tormenta tropical

Etapa de desarrollo hacia un sistema rotatorio de nubes distribuidas en espiral cada vez mejor organizadas, con circulación cerrada y presión atmosférica aún más baja. Los vientos máximos sostenidos van de 64 a 118 km/h y, de acuerdo con las normas internacionales, a partir de esta etapa se le asigna un nombre al sistema, el cual se escoge de una lista previamente definida por un grupo de especialistas

en ciclones tropicales que se reúne cada año en algún lugar de la Región IV de la Organización Meteorológica Mundial a la que pertenece México, junto con los países de América del Norte, Centroamérica y el Caribe.

### Huracán

Es la etapa de mayor fuerza de un ciclón tropical, en la cual su estructura está constituida por un sistema bien definido de nubes y vientos en forma de espiral, con circulación cerrada alrededor de un centro de presión mínima u ojo del huracán. El área nubosa de los huracanes puede cubrir grandes extensiones y sus vientos máximos sostenidos alcanzan o superan los 119 km/h, fuerza con la que alcanzan categoría I en la escala de huracanes Saffir-Simpson y que puede llegar a categoría V, dependiendo de la intensidad de los vientos máximos sostenidos.



Los vientos máximos sostenidos van de 64 a 118 km/h.

### Escala de los ciclones tropicales

La intensidad de los ciclones tropicales se mide por la velocidad de los vientos máximos sostenidos, es decir, la velocidad máxima del viento que se mantiene por un minuto en promedio, ya sea en etapa de depresión, tormenta o huracán.

Aunque hay diferentes escalas para medir la intensidad de un huracán, como la internacional de huracanes, con una graduación del 1 al 10, en México se usa la Saffir-Simpson basada en la intensidad de los vientos máximos sostenidos. Fue desarrollada por Herbert Saffir a finales de 1960, con base en el potencial de daños por vientos huracanados y ampliada por Robert Simpson en la década de 1970.

Esta escala presenta una graduación del I al V en relación con la magnitud de los daños materiales que puede causar



Depresión tropical.

el viento de un huracán, en donde la categoría I corresponde al de menos daños y el de categoría V al más destructivo. De acuerdo con la fuerza alcanzada en la escala Saffir-Simpson, se consideran como huracanes menores si alcanzan categoría I y II, y mayores si llegan a ser de categoría III a V.

Con el fin de informar a la población sobre los posibles efectos y daños que se pueden derivar por el paso de un huracán se diseñó la Escala de Saffir-Simpson Ampliada, que relaciona la categoría del huracán y sus efectos en la presión atmosférica, intensidad de viento y marea de tormenta, con los posibles daños a construcciones fijas y móviles, carreteras, árboles, anuncios; inundaciones, entre otros.

### Escala de huracanes Saffir-Simpson

Categoría	Vientos máximos sostenidos (km/h)	Características de los posibles daños materiales provocados por el viento
Uno	119 a 153	Daños mínimos. Árboles pequeños caídos; daños al tendido eléctrico.
Dos	154 a 177	Daños moderados. Adicionalmente a los daños del categoría Uno: Daño en tejados, puertas y ventanas; desprendimiento de árboles.
Tres	178 a 208	Daños extensos. Adicionalmente a los daños del categoría Dos: Grietas en construcciones.
Cuatro	209 a 251	Daños extremos. Adicionalmente a los daños del categoría Tres: Desprendimiento de techos en viviendas.
Cinco	252 o más	Daños catastróficos. Adicionalmente a los daños del categoría Cuatro: Daño muy severo y extenso en ventanas y puertas. Falta total de techos en muchas residencias y en construcciones industriales.

Escala de Saffir-Simpson y efectos potenciales

Categoría	Parámetros	Efectos
Uno	<p><b>Viento máximo</b> 74-95 mph 64-82 kt 119-153 km/h</p> <p><b>Presión barométrica mínima</b> igual o mayor a 980 mb igual o mayor a 28.94 pulgadas</p> <p><b>Marejadas</b> 4 a 5 pies arriba de lo normal 1.2 a 1.5 m arriba de lo normal</p>	<p><b>Daños mínimos</b> Daños principalmente a árboles, arbustos y casa móviles que no hayan sido sujetas. Daños ligeros a otras estructuras. Destrucción parcial o total de algunos letreros y anuncios panorámicos débilmente instalados. Caminos y carreteras en costas bajas inundados. Daños menores a los muelles y atracaderos. Las embarcaciones menores rompen sus amarres en áreas expuestas. Carreteras y caminos inundados cerca de las costas. Las rutas de escape en terrenos bajos se interrumpen 2 a 4 horas antes de la llegada del centro del huracán.</p>
	154 a 177	<p><b>Daños moderados</b> Adicionalmente a los daños del categoría Uno: Daño en tejados, puertas y ventanas; desprendimiento de árboles.</p>
Dos	<p><b>Viento máximo</b> 96-110 mph 83-95 kt 154-177 km/h</p> <p><b>Presión barométrica mínima</b> 965 a 979 mb 28.50 a 28.91 pulgadas</p> <p><b>Marejadas</b> 6 a 8 pies arriba de lo normal 1.6 a 2.5 m arriba de lo normal</p>	<p><b>Daños moderados</b> Daños considerables a árboles y arbustos, algunos derribados. Grandes daños a casas móviles en áreas expuestas. Extensos daños a letreros y anuncios. Destrucción parcial de algunos techos, puertas y ventanas. Pocos daños a estructuras y edificios. Daños considerables a muelles. Las marinas se inundan. Las embarcaciones menores rompen amarras en áreas abiertas. Se requiere la evacuación de residentes de terrenos bajos en áreas costeras.</p>
	209 a 251	<p><b>Daños Extremos</b> Adicionalmente a los daños del categoría Tres: Desprendimiento de techos en viviendas.</p>
Tres	<p><b>Viento máximo</b> 111-129 mph 96-112 kt 178-208 km/h</p> <p><b>Presión barométrica mínima</b> 941.5 a 964 mb 27.91 a 28.47 pulgadas</p> <p><b>Marejadas</b> 9 a 12 pies arriba de lo normal 2.6 a 3.6 m arriba de lo normal</p>	<p><b>Daños extensos</b> Muchas ramas son arrancadas a los árboles. Grandes árboles derribados. Anuncios y letreros que no estén sólidamente instalados son llevados por el viento. Algunos daños a los techos de edificios y también a puertas y ventanas. Algunos daños a las estructuras de edificios pequeños. Casas móviles destruidas. Marejadas inundando extensas áreas de zonas costeras con amplia destrucción de muchas edificaciones que se encuentren cerca del litoral. Las grandes estructuras cerca de las costas son seriamente dañadas por el embate de las olas y escombros flotantes. Las vías de escape en terrenos bajos se interrumpen 3 a 5 horas antes de la llegada del centro del huracán debido a la subida de las aguas. Los terrenos llanos de 5 pies o menos sobre el nivel del mar son inundados por más de 13 km tierra adentro. Posiblemente se requiera la evacuación de todos los residentes en los terrenos bajos a lo largo de las zonas costeras.</p>
Cuatro	<p><b>Viento máximo</b> 130-156 mph 113-136 kt 209-251 km/h</p> <p><b>Presión barométrica mínima</b> 920 a 944 mb 27.17 a 27.88 pulgadas</p> <p><b>Marejadas</b> 13 a 18 pies arriba de lo normal 4 a 5.5 m arriba de lo normal</p>	<p><b>Daños extremos</b> Árboles y arbustos, así como los anuncios y letreros son arrancados y destruidos por el viento. Hay extensos daños en techos, puertas y ventanas. Se produce colapso total de techos y algunas paredes en muchas residencias pequeñas. La mayoría de las casas móviles son destruidas o seriamente dañadas. Los terrenos llanos de 10 pies o menos sobre el nivel del mar son inundados hasta 10 km tierra adentro. Hay grandes daños a los pisos bajos de estructuras cerca de las costas debido al influjo de las inundaciones y el batir de las olas llevando escombros. Las rutas de escape son interrumpidas por la subida de las aguas 3 a 5 horas antes de la llegada del centro del huracán. Posiblemente se requiera una evacuación masiva de todos los residentes dentro de un área de unos 500 m de la costa y también de terrenos bajos hasta 3 km tierra adentro.</p>
Cinco	<p><b>Viento máximo</b> mayor a 157 mph mayor a 137 kt mayor a 252 km/h</p> <p><b>Presión barométrica mínima</b> por debajo de 920 mb por debajo 27.17 pulgadas</p> <p><b>Marejadas</b> mayores a 18 pies arriba de lo normal mayores a 5.5 m arriba de lo normal</p>	<p><b>Daños catastróficos</b> Situación caótica. Árboles y arbustos son totalmente arrasados por el viento y arrancados de raíz. Daños de gran consideración a los techos de los edificios. Los anuncios y letreros arrancados, destruidos y llevados por el viento a considerable distancia, ocasionando a su vez más destrucción. Daños muy severos y extensos a ventanas y puertas. Hay colapso total de muchas residencias y edificios industriales. Se produce una gran destrucción de cristales en puertas y ventanas que no hayan sido protegidos. Muchas casas y edificios pequeños derribados o arrasados. Destrucción masiva de casas móviles. Ocurren daños considerables a los pisos bajos de todas las estructuras a menos de 15 pies sobre el nivel del mar hasta más de 500 m tierra dentro. Las rutas de escape en terrenos bajos son cortadas por la subida de aguas entre 3 a 5 horas antes de la llegada del centro del huracán. Posiblemente se requiera una evacuación masiva de todos los residentes en terrenos bajos dentro de un área de 8 a 16 km de las costas.</p>

### EFFECTOS DE CICLONES TROPICALES

Son varios los efectos de los ciclones tropicales durante las etapas de su desarrollo, entre ellos: el viento, la lluvia, el oleaje, la marea de tormenta y las inundaciones.

**Viento.** Constituye uno de los principales elementos que distingue a los ciclones tropicales; es el origen de otros efectos de peligro como el oleaje y la marea de tormenta. Cuando un ciclón llega a la etapa de huracán, los vientos (mayores a 119 km/h) se vuelven un grave peligro para la navegación por el oleaje que generan, mientras que en las zonas costeras habitadas, la fuerza del viento puede levantar techos, tirar árboles y destruir casas. Con el huracán *Gilbert* de 1988, el viento máximo sostenido alcanzó 295 km/h.

**Lluvia.** Los ciclones tropicales son portadores de grandes cantidades de humedad y al interactuar con otros factores como la orografía, las precipitaciones pueden ser de mayor magnitud y causar grandes daños en vidas humanas e infraestructura, como sucedió con el huracán *Pauline*, en 1997, en Acapulco, Guerrero.

**Marea de tormenta.** Es el aumento en el nivel medio del mar de más de un metro en la costa, provocado por el viento que sopla con dirección a la playa. La marea de tormenta alcanza su máxima expresión cuando se le suma la marea astronómica, originada por la atracción de la Luna y el Sol sobre la Tierra. Si al aumento en el nivel del mar se agrega el producido por el oleaje, el peligro de inundación en las poblaciones de las zonas bajas de la costa se traduce en un importante riesgo para la población y sus bienes.

**Oleaje.** Se debe a la intensidad y acción de los vientos sobre la superficie del mar, principalmente en la etapa de huracán, que es cuando alcanzan su máxima potencia. El oleaje, en conjunto con el aumento en el nivel medio del mar por la marea de tormenta, puede ocasionar inundaciones en las poblaciones de las zonas costeras, así como afectaciones al medio natural con daños graves en los ecosistemas, y aún en las playas, donde la socavación y arrastre de grandes cantidades de arena provoca cambios en el paisaje de los centros turísticos.



Inundaciones provocadas por "Arlene" en Tamaulipas, 2011.

## ZONAS Y REGIONES CICLOGENÉTICAS EN EL MUNDO Y MÉXICO

Existen áreas donde la interacción de las condiciones océano-atmósfera favorecen la formación de ciclones, a estos sitios se les conoce como zonas ciclogénicas cuando son de grandes extensiones, y regiones matrices cuando son áreas más pequeñas dentro de una zona ciclogénica.

Las principales zonas generadoras de ciclones tropicales en el mundo son: Atlántico Norte, Pacífico Nororiental, Pacífico Noroeste, Océano Índico del Norte, Océano Índico del Sur y Océano Pacífico Suroeste y área australiana. De todas ellas, son dos las de mayor importancia para México: la del Atlántico Norte y la del Pacífico Nororiental, debido a que se encuentran las regiones matrices en donde se generan muchos de los ciclones tropicales que lo afectan directa o indirectamente.

La República Mexicana se encuentra en el área de influencia de cuatro importantes centros generadores de ciclones tropicales: la región del golfo de Tehuantepec (dentro de la

zona del Pacífico Nororiental), la Sonda de Campeche en el Golfo de México, la del Mar Caribe y la del Atlántico Norte. Ahí es donde se forman los ciclones tropicales que amenazan al país con un alto potencial de riesgo para los asentamientos de población en los estados costeros, y aún para los del interior del país.

## TRABAJO CON OTRAS INSTITUCIONES

Hasta ahora los estudios realizados por el Servicio Meteorológico Nacional arrojan que en el Océano Pacífico, específicamente en su zona Nororiental, se forman, cada temporada, cerca de 15 ciclones tropicales con al menos una intensidad de 63 km/h. Y que en el Atlántico, incluyendo el Golfo de México y el Caribe, se gestan en promedio 11 con las mismas características.

De los 15 ciclones que se forman en el Pacífico, siete se mantienen como tormenta tropical y ocho se convierten en huracanes, cuatro de ellos entre las categorías 3 a 5 de la Escala Saffir-Simpson, es decir, muy intensos.



México se encuentra en el área de influencia de cuatro centros generadores de ciclones.

Respecto al Atlántico, de los 11 ciclones, cinco se mantienen como tormenta tropical y seis se transforman en huracán; de estos últimos dos son intensos.

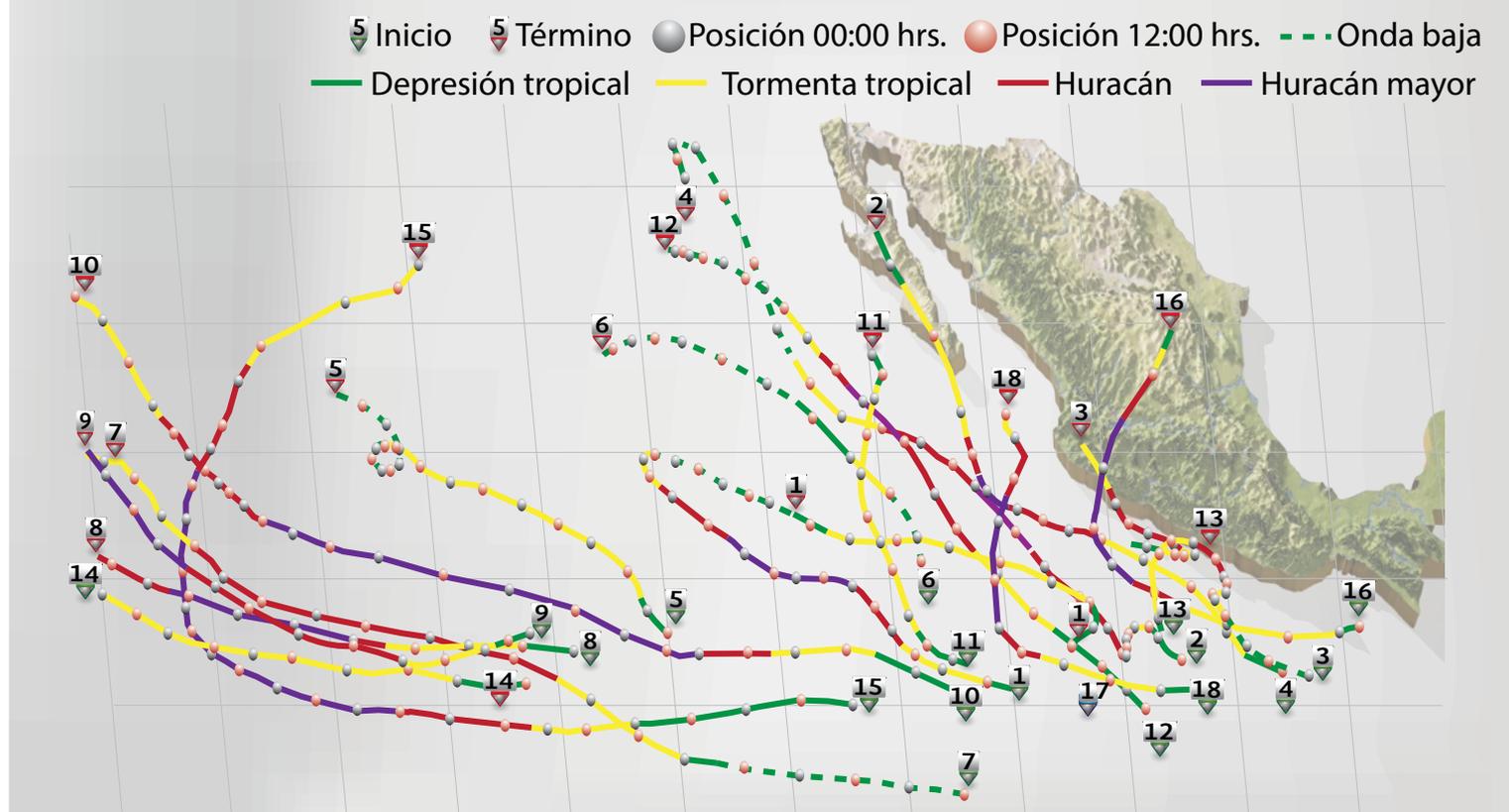
Actualmente es imposible pronosticar, desde el inicio de la temporada, cuántos ciclones tropicales impactarán, dónde y cuál será su intensidad. Pese a esto, se ha implementado un mecanismo de respuesta que privilegia las acciones preventivas sin descuidar la atención a la población en contingencias, llamado Sistema de Alerta Temprana para Ciclones Tropicales (SIAT-CT).

Organizado por el gobierno federal en el marco del Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC), el programa cuenta con el apoyo del Servicio Meteorológico Nacional que, como

integrante activo, provee información vital que ayuda a la toma de decisiones en caso de que impacte un ciclón tropical.

En el ámbito internacional y como miembro de la Región IV de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), México colabora con los gobiernos de los países de América del Norte, Centroamérica y el Caribe para proteger a las personas y los bienes contra los ciclones tropicales violentos. La séptima reunión de la Asociación Regional IV, celebrada en la Ciudad de México entre abril y mayo de 1977, estableció el Comité de Huracanes de la Asociación Regional IV (AR IV), en cuyo seno se definen por consenso los nombres que llevarán los ciclones tropicales de los océanos Atlántico y Pacífico Nororiental.

## SEGUIMIENTO DE HURACANES PACÍFICO 2015



### Nombres

1 Andrés May 28-Jun 4	6 Felicia Jul 23-24	11 Kevin Ago 31-Sep 5	15 Olaf Oct 15-27
2 Blanca May 31- Jun 9	7 Guillermo Jul 29-Ago 7	12 Linda Sep 5-10	16 Patricia Oct 20-24
3 Carlos Jun 10-17	8 Hilda Ago 6-13	13 Marty Sep 26-Oct 1	17 Ric Nov 18-22
4 Dolores Jul 11-18	9 Ignacio Ago 25-Sep 5	14 Nora Oct 9-15	18 Sandra Nov 23-28
5 Enrique Jul 12-18	10 Jimena Ago 26-Sep 9		

Nombres para los ciclones tropicales de 2015 a 2019 en el Caribe, Golfo de México y Atlántico Norte

2015	2016	2017	2018	2019
Ana	Alex	Arlene	Alberto	Andrea
Bill	Bonnie	Bret	Beryl	Barry
Claudette	Colin	Cindy	Chris	Chantal
Danny	Danielle	Don	Debby	Dorian
Erika	Earl	Emily	Ernesto	Erin
Fred	Fiona	Franklin	Florence	Fernand
Grace	Gaston	Gert	Gordon	Gabrielle
Henri	Hermine	Harvey	Helene	Humberto
Ida	Ian	Irma	Isaac	Imelda
Joaquín	Julia	José	Joyce	Jerry
Kate	Karl	Katia	Kirk	Karen
Larry	Lisa	Lee	Leslie	Lorenzo
Mindy	Matthew	María	Michael	Melissa
Nicholas	Nicole	Nate	Nadine	Néstor
Odette	Otto	Ophelia	Óscar	Olga
Peter	Paula	Philippe	Patty	Pablo
Rose	Richard	Rina	Rafael	Rebekah
Sam	Shary	Sean	Sara	Sebastien
Teresa	Tobías	Tammy	Tony	Tanya
Víctor	Virginie	Vince	Valerie	Van
Wanda	Walter	Whitney	William	Wendy

Nombres para los ciclones tropicales de 2015 a 2019 en el océano Pacífico Nororiental

2015	2016	2017	2018	2019
Andrés	Agatha	Adrián	Aletta	Alvin
Blanca	Blas	Beatriz	Bud	Bárbara
Carlos	Celia	Calvin	Carlotta	Cosme
Dolores	Darby	Dora	Daniel	Dalila
Enrique	Estelle	Eugene	Emilia	Erick
Felicia	Frank	Fernanda	Fabio	Flossie
Guillermo	Georgette	Greg	Gilma	Gil
Hilda	Howard	Hilary	Héctor	Henriette
Ignacio	Isis	Irwin	Ileana	Ivo
Jimena	Javier	Jova	John	Juliette
Kevin	Kay	Kenneth	Kristy	Kiko
Linda	Lester	Lidia	Lane	Lorena
Marty	Madeline	Max	Miriam	Mario
Nora	Newton	Norma	Norman	Narda
Olaf	Orlene	Otis	Olivia	Octave
Patricia	Paine	Pilar	Paul	Priscilla
Rick	Roslyn	Ramón	Rosa	Raymond
Sandra	Seymour	Selma	Sergio	Sonia
Terry	Tina	Todd	Tara	Tico
Vivian	Virgil	Verónica	Vicente	Velma
Waldo	Winifred	Wiley	Willa	Wallis
Xina	Xavier	Xina	Xavier	Xina
York	Yolanda	York	Yolanda	York
Zelda	Zeke	Zelda	Zeke	Zelda



Huracán *Odile* en Navolato, Sinaloa. Septiembre de 2014.

# TORNADOS Y TROMBA MARINA

## DIÁMETRO

Entre 100 m y 1.5 km

## DESPLAZAMIENTO

Desde 50 hasta más de 100 km/h

## INTENSIDADES

### F0

De 60 a 100 km/h



Daños leves

### F1

De 100 a 180 km/h



Daños moderados

### F2

De 180 a 250 km/h



Daños considerables

### F3

De 250 a 320 km/h



Daños severos

### F4

De 320 a 420 km/h



Daños devastadores

### F5

De 420 a 550 km/h



Daños increíbles

## TORNADO

Este fenómeno meteorológico violento e impredecible es provocado por vientos que giran desde una formación nubosa en forma de embudo, y aunque dura poco, puede ser devastador. La mayoría de los tornados cuentan con vientos que llegan a velocidades de entre 65 y 180 km/h, miden aproximadamente 75 metros de ancho y se trasladan varios kilómetros antes de desaparecer. Los más extremos pueden tener vientos con velocidades que pueden girar a 450 km/h o más, medir hasta 2 km de ancho y permanecer tocando el suelo a lo largo de más de 100 km de recorrido.

Una corriente de aire frío y seco desciende desde lo alto de una nube tipo "Cumulus nimbus" (con menos 2 km de altitud) para compensar el aire cálido y húmedo que asciende. Al ser más pesado el aire frío se producen capas de aire inestable.



1

2

3

5

4

Las corrientes ascendentes aumentan la rotación y se convierte en una columna estrecha, conocida como "nube embudo" hasta la superficie terrestre.

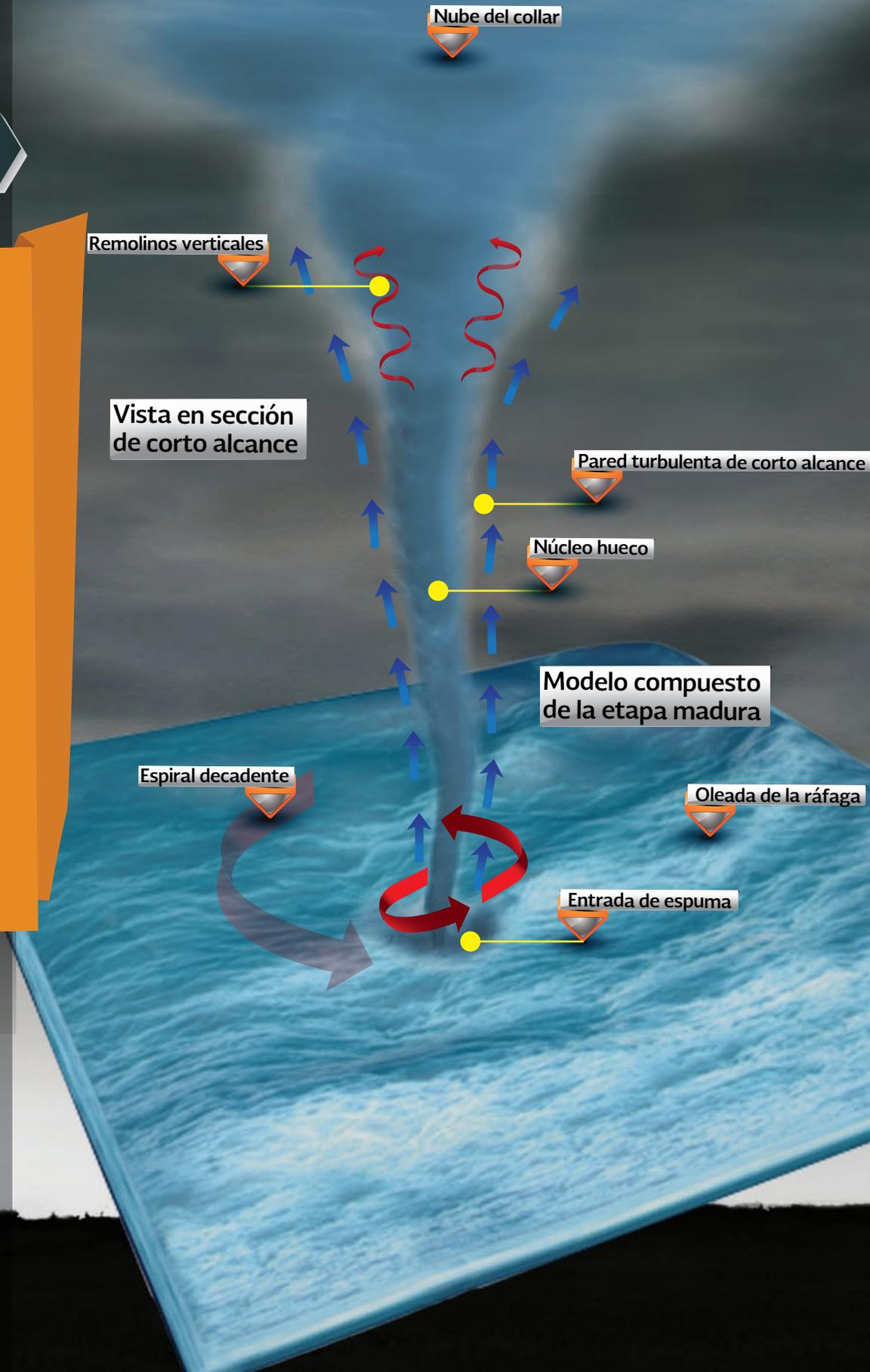
Llega a su clímax cuando ingresa una mayor cantidad de aire caliente y húmedo que le da energía. Puede durar pocos minutos o más de una hora. Durante este tiempo el tornado causa daños, dependiendo de la intensidad.

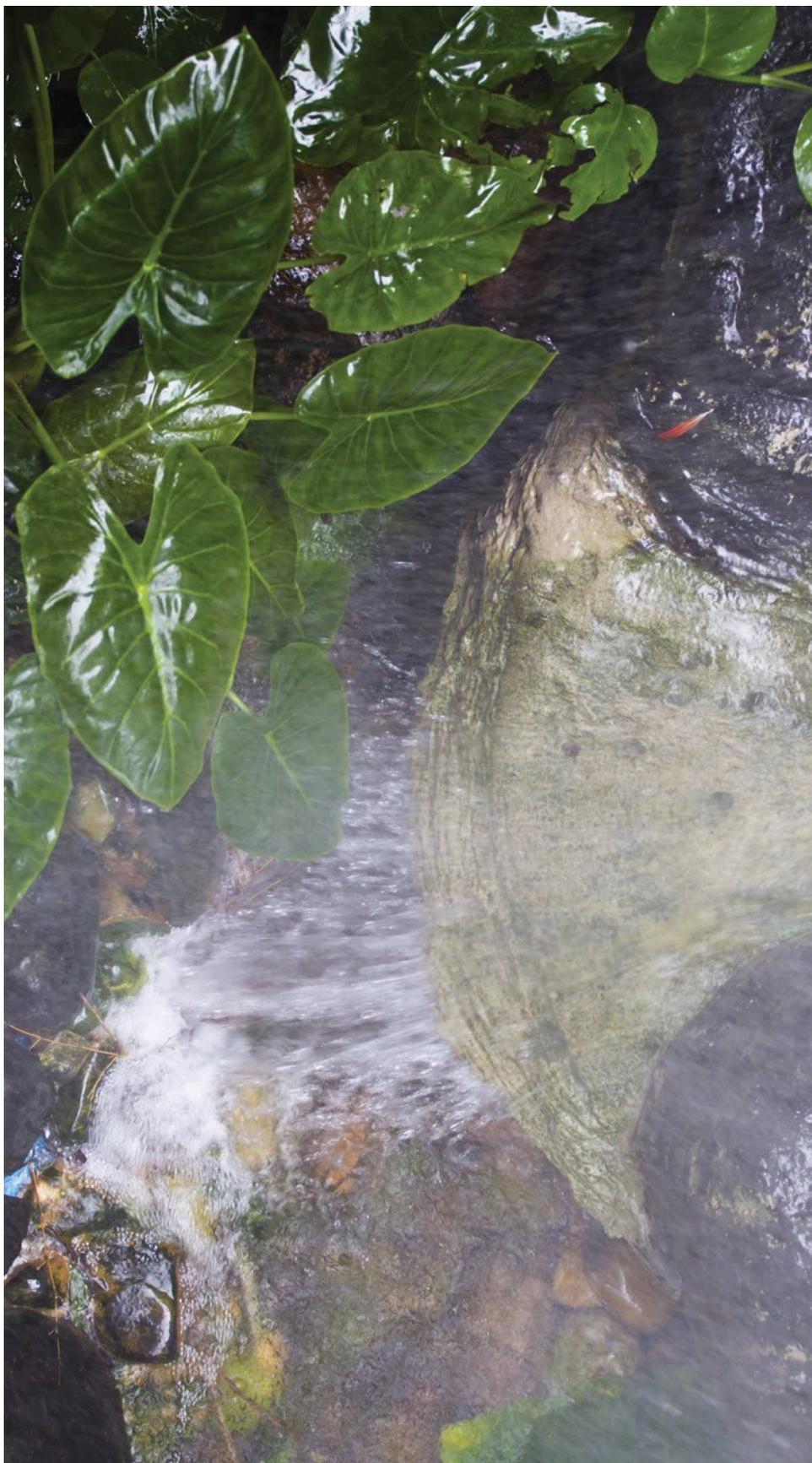
Si la diferencia de temperatura es grande el descenso del aire frío se da en forma de remolino y conforme se acerca al suelo su velocidad aumenta.

El centro del tornado tiene baja presión atmosférica, por lo cual cambia la dirección de forma errática.

## TROMBA MARINA O MANGA DE AGUA

Es un embudo conteniendo un intenso vórtice o torbellino que ocurre sobre un cuerpo de agua, usualmente conectado a una nube cumuliforme. Las trombas marinas se dividen en dos tipos: tornádicas y no tornádicas. Como su nombre claramente lo indica, las primeras son tornados, ya sea formados sobre el agua o en tierra y que pasaron luego al medio acuoso, mientras que las segundas, si bien similares en apariencia, no son tornados, su severidad rara vez excede el tipo F0 en la escala de Fujita (menos de 116 km/h).





Las ondas tropicales pueden aparecer en abril o mayo.

Estos nombres se repetirán en 2020, partiendo de 2014. Sin embargo, si un ciclón tropical provoca muertes, daños u otras razones especiales, a petición de algún miembro y por consenso del Comité podrá sustituirse el nombre.

Si en un año el número de tormentas rebasa la lista, se empleará el alfabeto griego (*alpha*, *beta*, etcétera) para designar los sistemas sucesivos. Y si un ciclón tropical pasa de una cuenca a otra, este conservará su nombre.

## **ONDAS TROPICALES, MONZÓN Y CANALES DE BAJA PRESIÓN**

### **Ondas tropicales**

Las ondas tropicales del Este son los sistemas sinópticos más importantes observados en el Atlántico Norte y norte de África en el verano, se desplazan de Este a Oeste a una velocidad promedio de 10 a 15 kt, y alcanzan su máxima actividad entre los 3,000 y 6,000 m de altura, inclinándose hacia el Este.

Estas ondas, por su relación con la lluvia convectiva, son precursoras en la formación de ciclones tropicales en las cuencas del Atlántico y el Pacífico. Además se pueden detectar con imágenes satelitales, ya que aparecen como una zona de nubosidad circular o bandas.

Las ondas tropicales pueden aparecer en abril o mayo, y continuar hasta octubre o noviembre. Aparecen por un periodo de 3 a 4 días, con una longitud de onda de 2,000 a 4,000 km. En promedio se llegan a formar 60 ondas tropicales al año.

Las lluvias que producen recargan acuíferos, sin embargo, el incremento excesivo en ríos, arroyos, lagunas y presas puede dañar poblaciones.

### **Monzón**

La palabra se deriva del vocablo árabe *mausin*, que significa estación. Una circulación monzónica se define como el cambio en la dirección de los vientos estacionales entre el continente y el océano, es decir, cada año durante una estación se observan vientos que circulan del océano a la tierra, y durante otra se registrará una inversión en la dirección de los vientos.

Los mecanismos para la formación de la circulación monzónica son prácticamente los mismos que para las brisas comunes de mar y tierra, sólo que en este caso las escalas de tiempo y espacio son mucho más grandes. Básicamente el calentamiento diferencial entre el continente y el océano es

el principal mecanismo generador: durante verano el mayor calentamiento de los continentes, comparado con el de los océanos, genera una zona de baja presión en las zonas continentales y de alta presión sobre las regiones oceánicas. La diferencia de presión a nivel superficial da por resultado una fuerza que tiende a balancear las dos zonas, desarrollándose un transporte de propiedades como calor, masa, y energía.

Existen cuatro regiones donde se generan circulaciones monzónicas: el Suroeste de Asia y el Índico; en Australia y la Polinesia; en África Noroccidental y el Atlántico oriental, y en el Suroeste de América del Norte.

Durante el verano, de julio a septiembre, el desierto sonorense<sup>11</sup> sufre un alza tremenda de temperatura y baja presión superficial, lo que favorece la convergencia de masas de aire húmedo y caliente originadas en el Atlántico y en el Golfo de México, con las masas de aire provenientes del Pacífico tropical oriental y el golfo de California.

El monzón está relacionado con el inicio de las lluvias de verano, con el flujo de humedad del sur sobre el golfo de California y con la formación de un centro de baja presión en Sonora y Arizona, que a su vez está asociado a una convergencia y circulación ciclónica en la Sierra Madre Occidental y la vertiente del Pacífico mexicano.

Las circulaciones monzónicas tienen gran influencia en el inicio e intensidad de las lluvias.

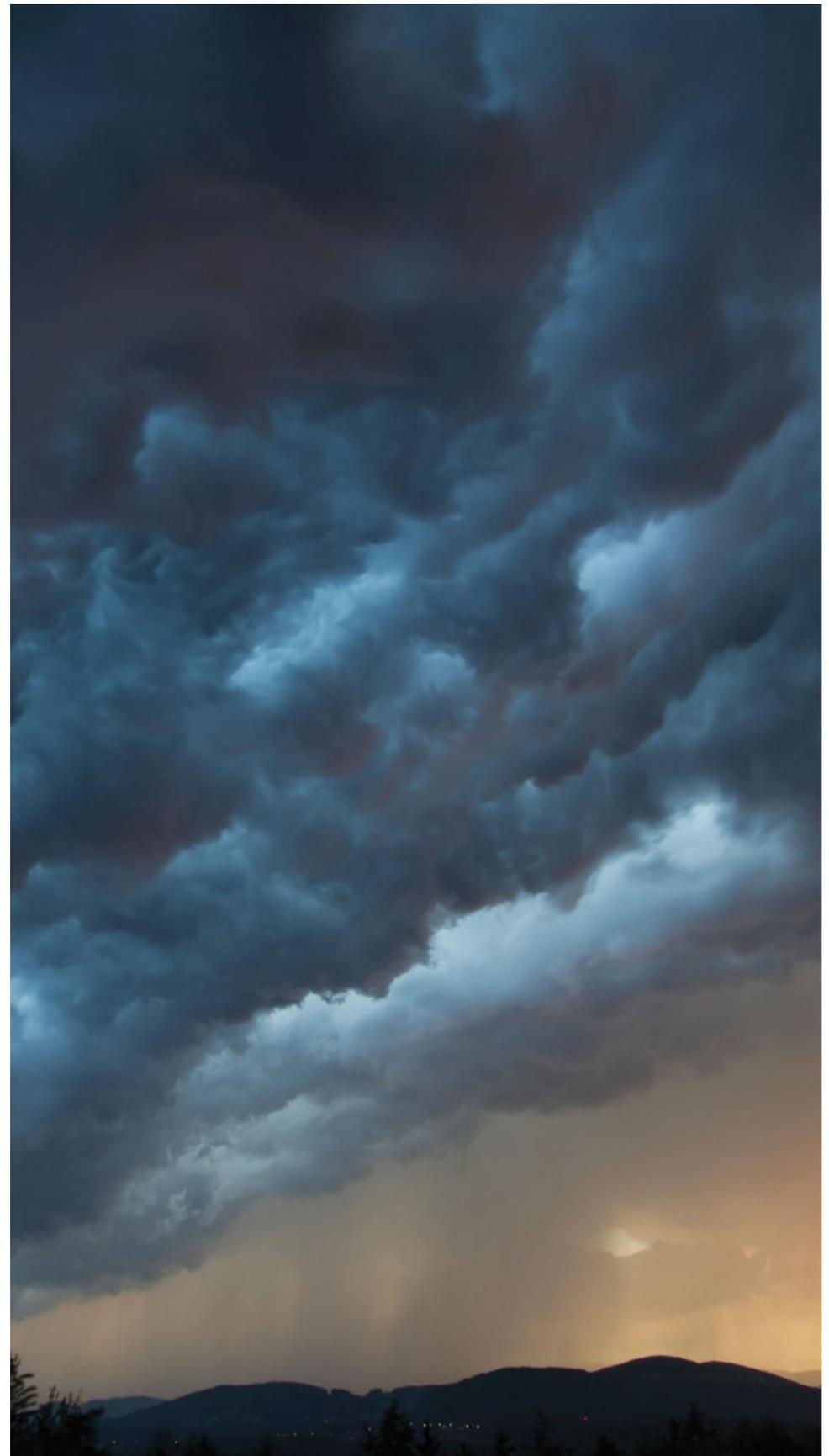
### Baja presión

Cuando hay baja presión, la tensión barométrica disminuye hacia el centro y el aire fluye alrededor del sistema en sentido contrario a las manecillas del reloj en el hemisferio Norte. En un mapa sinóptico se representa mediante una B o L. Todo sistema bórico en el hemisferio Norte con una corriente de viento en rotación inversa o ciclónico es un ciclón, por ejemplo, los huracanes son un sistema de baja presión.

Es decir que, regularmente, una baja presión es un sistema asociado al mal tiempo.

Existen bajas presiones térmicas causadas por el calentamiento intenso de la superficie y la resultante baja densidad del aire sobre áreas continentales áridas, son un tanto secas con pocas nubes y prácticamente ninguna precipitación. Estas bajas presiones son estacionarias y predominan sobre áreas continentales en el verano.

<sup>11</sup> El desierto sonorense comprende la península de Baja California, Sonora y Arizona.



Las circulaciones monzónicas tienen gran influencia en la intensidad de las lluvias.

## TORNADOS

Un tornado es una violenta columna de aire en rotación que se extiende de un cumulonimbo o un cúmulo congestus hasta alcanzar la superficie. Es el más destructivo de todos los fenómenos atmosféricos de escala local. La velocidad del viento de los vórtices de la mayoría de los tornados se estima en al menos 180 km/h. Aquellos que duran entre algunos segundos y más de una hora, recorren distancias que van de los 100 metros a decenas de kilómetros, con velocidades de 15 a 45 km/h.

### Tornados alrededor del mundo

Los tornados ocurren en casi todos los continentes, excepto en la Antártida. Son más comunes en las planicies de Norteamérica y Australia. Sin embargo, pocas regiones tropicales cuentan con registros sobre estos. En México, por ejemplo, muchas de las observaciones populares fueron registradas como asuntos con asunciones de influencia religiosa, con entidades sobrenaturales y encubiertos con nombres como culebra, víbora, manga de agua, huracán, etcétera. Y en el ámbito científico, en un estudio realizado en 2013 por el Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social (CIESAS), se registraron durante el periodo 2000-2012, alrededor de 126 tornados en gran parte del país.

## TORMENTAS ELÉCTRICAS Y GRANIZADAS

### Tormentas eléctricas

Los rayos han sido temidos y venerados desde el inicio de la humanidad. Los griegos creían que eran producidos por Zeus, los vikingos que el causante era Thor y en la Biblia que el rayo y el trueno eran hechos divinos.

A mediados del siglo XVIII, Benjamín Franklin (1706-1790) realizó los primeros experimentos que mostraron la semejanza entre el rayo y las chispas eléctricas

Una tormenta eléctrica está formada por varias células o regiones con una superficie límite horizontal donde ocurren los procesos básicos. Al principio se forman corrientes ascendentes de aire y a medida que suben, el aire húmedo y tibio de abajo se enfría y se condensa. Al concentrarse libera calor y, por lo tanto, seguirá siendo más caliente que el aire circundante y continuará subiendo a zonas más frías. Las corrientes de unos 100 km/h suben hasta llegar a los 10,000 o 15,000 m de altura.

Las gotas condensadas se sobre-enfrían y pueden llegar a temperaturas bajo cero. Cuando el líquido se transforma en sólido y se vuelve más pesado, comienza a caer, arrastrando aire circundante y creando una corriente descendente del aire frío que estaba a gran altura. Este es el viento que anticipa una tormenta.



El Estado de México, en sus cercanías con el Distrito Federal, tuvo el mayor registro. Le siguen Chihuahua con nueve, Nuevo León con seis y Coahuila con cinco. Esta última entidad sufrió, en 2007, un tornado particularmente devastador del tipo supercelda; el más violento del que se tiene registro.



El rayo es una enorme corriente eléctrica.

Cada segundo, varios cientos de relámpagos estallan alrededor de la Tierra. Estas chispas gigantescas se deben a las descargas eléctricas llamadas rayos que se producen durante la fase de madurez de una tormenta. Además de espectacular, este fenómeno también puede ser peligrosísimo, pues la corriente eléctrica de 100,000 amperios, albergada en un rayo, es la causa de muerte de cientos de personas en un año, de numerosos incendios, cortocircuitos, apagones y perturbaciones electromagnéticas.

El rayo es una enorme corriente eléctrica que circula entre dos nubes o entre nube y tierra<sup>12</sup>. Se sabe que la parte superior de la tormenta eléctrica (a 6 o 7 km de altura y  $-20^{\circ}\text{C}$ ) tiene carga positiva y la inferior (a 3 o 4 km y entre 0 y  $-10^{\circ}\text{C}$ ) negativa, excepto por una pequeña zona de la parte inferior que tiene carga positiva. La carga de la parte inferior puede producir diferencias de potenciales de 20, 30 o 100 millones de volts entre la nube y el suelo, superando el potencial de ruptura del aire. Cuando se produce el quiebre, los rayos transportan las cargas negativas a la tierra y la cé-

lula regenera lo perdido en 5 segundos aproximadamente, pues se debe empalmar una zona cargada negativamente con una zona cargada positivamente, obedeciendo a la regla: dos cargas eléctricas opuestas se atraen.

Una vez que comienza la separación se forman campos eléctricos que ionizan el aire circundante, moviéndose chocando con átomos, a los que se le arrancan electrones, para obtener más cargas. Aunque no se conoce exactamente el origen de los rayos, sí se sabe cómo se separan las cargas en una tormenta eléctrica.

### Otros tipos de rayos

**Difusos.** Se presentan como resplandor que ilumina el cielo. Son reflejos en el cielo de una tempestad muy lejana, localizada bajo el horizonte, cuyas chispas no se ven y cuyos truenos no se escuchan.

**Laminares.** Son aquellos resplandores que resultan de la descarga dentro de la nube, entre las cargas positivas y negativas.

**Esferoidal, de bola o rosario.** Se presenta en forma de una esfera luminosa, llegando a alcanzar el tamaño de una pelota de fútbol. En algunas ocasiones aparecen varios de ellos

<sup>12</sup> Aunque son los más espectaculares, sólo 20% de los relámpagos llega al suelo.



El rayo que se ve va del suelo a la nube.

formando un rosario. A veces desaparecen escuchándose un estallido y otras lo hacen silenciosamente.

### Cargas

Si tenemos una nube con cargas negativas sobre una superficie llana, su potencial es negativo y serán aceleradas hacia la tierra, que tiene carga positiva. Primero se produce una descarga llamada guía escalonada, no brillante, que baja a un sexto de la velocidad de la luz, recorre aproximadamente 50 m, se detiene 50 microsegundos y sigue sucesivamente hasta 10,000 veces.

La columna está repleta de cargas negativas y el aire aumenta sus propiedades como conductor, por ionización. Cuando la guía escalonada está a unos 100 metros del suelo se da una descarga que sube a encontrarla. Al hacer contacto, se crea una conexión nube-tierra y las cargas de la nube pueden escaparse.

El rayo que se ve es de retorno que, contrario a lo que se cree, va del suelo a la nube y no al revés. El brillo es aproximadamente igual al de 100 millones de lamparitas. El calor producido por la descarga eléctrica calienta el aire y lo expande bruscamente, dando lugar a ondas de presión que actúan como ondas sonoras y así se produce el trueno. Como la velocidad del sonido es de aproximadamente 340 metros/s, y menor a la de la luz, el trueno se escucha después de desaparecer el rayo.

En el rayo, la corriente es de unos 10,000 amperes y se transporta unos 20 o 30 coulombios de carga.

Cuando el rayo de retorno desaparece bajo otra guía, llamada guía oscura, pero sin pausas, sigue el mismo camino llevando cargas negativas. Y cuando toca tierra sube otro rayo de retorno. Así, éste puede caer varias veces y sucesivamente, llegándose a registrar hasta 42.

Si la guía se ramifica en dos, una puede tocar tierra antes que la otra. El rayo de retorno sube a lo largo de la rama que alcanza primero al suelo, llega a la nube pasando por la otra rama, y proyecta el primer rayo en un lugar y el segundo en otro.

Una de cada diez veces el rayo es iniciado por guías que contienen cargas positivas. El rayo de retorno lleva cargas negativas y transfiere cargas positivas de la nube a la tierra. Habitualmente no hay guías oscuras subsecuentes. Los rayos positivos causan mucho más daño porque generan corrientes dobles al valor habitual. Son los principales responsables de los incendios forestales.

## Pararrayos

En 1752, durante una tormenta, Benjamín Franklin remontó un barrilete con un hilo mojado para conducir la electricidad. Él sostenía el tramo seco. El barrilete, con una punta metálica y una llave cerca del extremo, estaba sometido a un campo eléctrico que provocaba un movimiento de cargas desde la nube hacia la tierra, donde Benjamín Franklin registraba las pequeñas descargas. A partir de este ensayo se empezaron a crear los pararrayos.

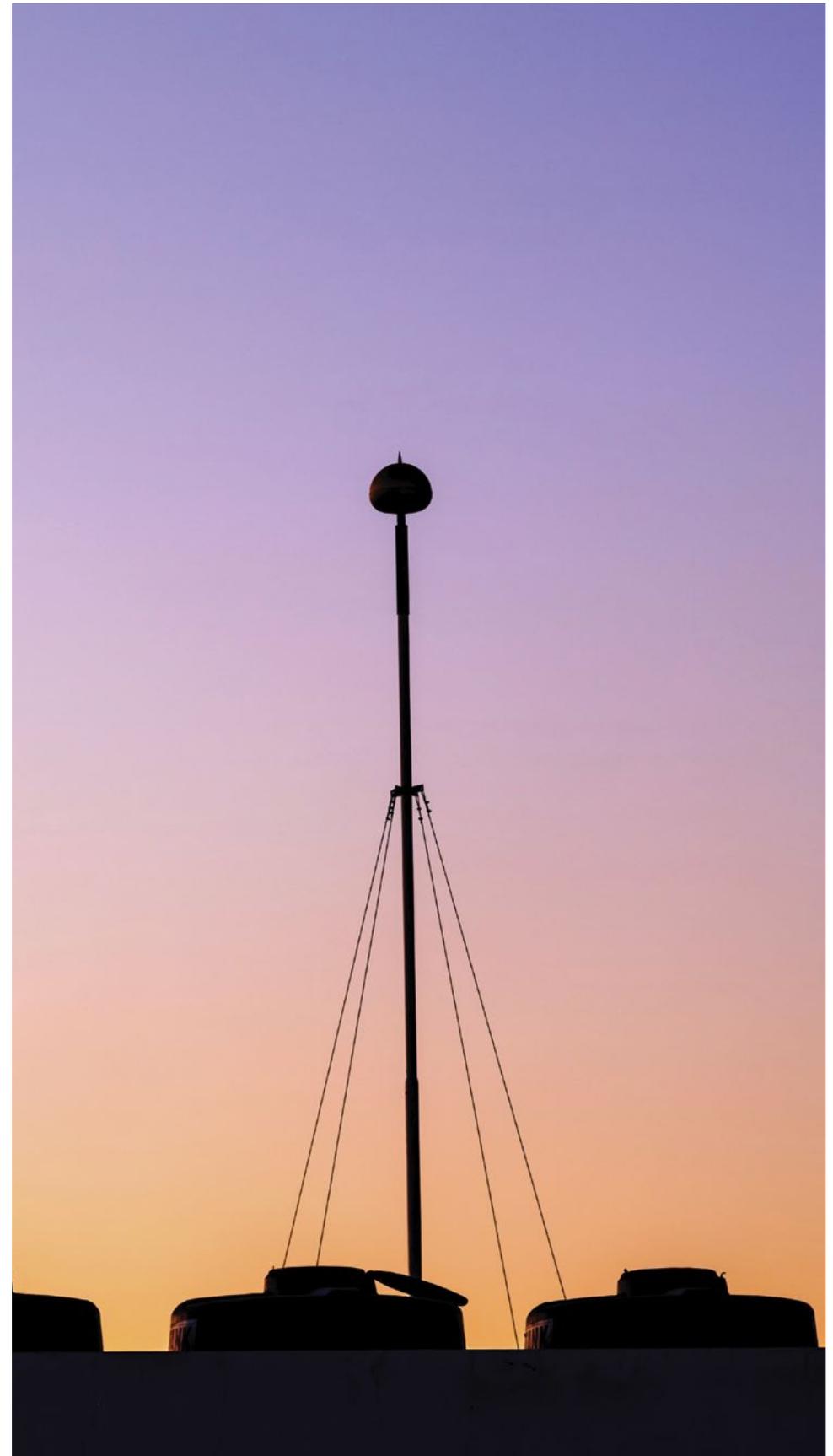
El pararrayos es un dispositivo, usualmente acabado en punta, que excita la aparición de la guía. Se emplea un objeto puntiagudo porque el campo eléctrico es tan intenso que, durante una tormenta, busca una guía o camino más corto y fácil y que encuentra en esa punta. Por lo tanto, si se produce el rayo, las cargas se conducirán a través del pararrayos sin causar daños. Las partes principales de un pararrayos son:

1. **La varilla.** Es cilíndrica y de 3 a 5 metros de altura, con una o más puntas de acero galvanizado o cobre. Está instalada en la parte más elevada de un edificio o construcción. La punta está recubierta de wolframio (punto de fusión 3,650°C), que puede soportar las altas temperaturas que produce el rayo.
2. **El conductor aéreo.** Formado por un cable de cobre de más de 11 milímetros de diámetro. No está aislado del edificio que protege.
3. **El conductor subterráneo.** Son placas de cobre o acero galvanizado de 1 m<sup>2</sup> de superficie por lo menos, hundidas en tierra húmeda y unidas al conductor aéreo. Si el terreno es seco se utiliza como conductor subterráneo un cable muy largo enterrado a lo largo del edificio.

## Tipos

**Franklin.** Se basa en la teoría del efecto punta, es decir, que las cargas se acumulan en las partes puntiagudas de un conductor y los campos eléctricos son más intensos allí. Por lo tanto, las descargas se dirigen a la punta del pararrayos, el punto más alto. La zona de cobertura es un cono, cuya base tiene un radio igual a la distancia desde tierra a la punta del pararrayos ( $A = R$ ).

**Piezoeléctrico.** Se basa en el fenómeno que presenta el cuarzo, que al ser presionado produce una descarga eléctrica entre dos electrodos. En este caso, la fuerza es producida por el viento al actuar el vástago del pararrayos, por lo que funciona mejor cuanto más fuerte es el viento.



Si se produce un rayo, las cargas se conducirán a través del pararrayos sin causar daños.

# RELÁMPAGOS Y TORMENTAS

## LOS RAYOS

La descarga eléctrica precipitada del rayo es acompañada por la emisión de luz (el relámpago), causada por el paso de corriente eléctrica que ioniza las moléculas de aire, y por el sonido del trueno, desarrollado por la onda de choque. La electricidad (corriente eléctrica) que pasa a través de la atmósfera, calienta y expande rápidamente el aire, produciendo el ruido característico del trueno.

Por el efecto de ida y vuelta, cuando las partículas regresan provocan el efecto visual de que los rayos bajan.

Partículas negativas

Cumulonimbos

Generalmente los rayos son producidos por partículas positivas en la tierra y negativas en nubes de desarrollo vertical llamadas Cumulonimbos.

Las cargas positivas se concentran en los objetos elevados cuya conductividad eléctrica es mejor que la del aire.

Construcciones, árboles, seres vivos, objetos metálicos.

El arco de retorno proviene generalmente de los objetos.

Partículas positivas

## DATOS

**1**

Sólo 20% de los relámpagos llega hasta el suelo



**2**

Las cargas pueden producir intercambio de rayos. Entre nubes con distinta carga eléctrica.



**3**

También pueden producirse rayos en el interior de una misma nube.



**4**

E incluso, los rayos pueden generarse entre una nube y el aire circundante.



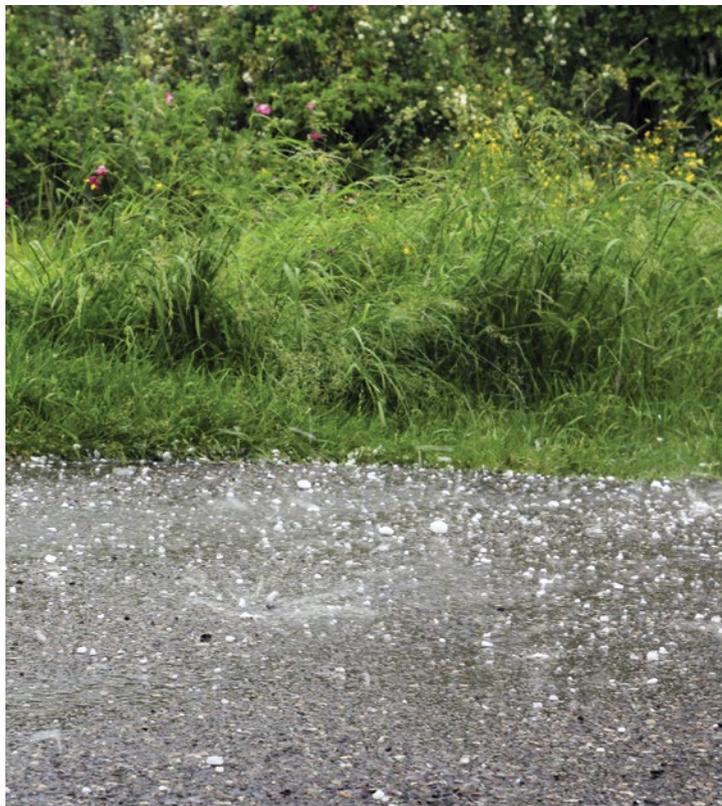
## RAYOS MÁS CONOCIDOS

Algunos rayos presentan características particulares; los científicos y el público en general han dado nombres a estos diferentes tipos de rayos. El rayo que se observa más comúnmente es el rayo *streak*. Esto no es más que el trazo de retorno, la parte visible del trazo del rayo. La mayoría de los trazos se producen dentro de una nube, por lo que no vemos la mayoría de los trazos individuales de retorno durante una tormenta.

En el rayo la corriente es de unos 10,000 amperes y se transporta unos 20 o 30 coulombios de carga.

**Ión-Corona solar.** Tiene un dispositivo eléctrico emisor de iones y un acelerador de partículas polarizadas. Es más eficaz que el radiactivo, ya que produce una ionización constante, mientras que la emisión del primero se incrementa en forma proporcional al cuadrado de la disminución de la distancia, lo que aumenta las probabilidades de que la guía se descargue en él. No genera una ionización peligrosa para las personas o para el medio ambiente. Está formado por dos electrodos que producen efluvios eléctricos y una pequeña luminosidad (Efecto Corona). Necesita energía eléctrica para el ionizador, generalmente suministrada por un panel solar.

**Jaula de Faraday o reticular.** Se basa en el fenómeno descubierto por el físico inglés Michael Faraday (1791-1867). Si rodeamos un ambiente con una lámina conductora, el campo externo eléctrico redistribuye los electrones libres en el conductor, dejando una carga positiva neta sobre la superficie externa en algunas regiones y una carga negativa neta en otras. El dispositivo consiste en un retículo o malla tendida a lo largo de los aleros del tejado o terraza de grandes edificios y conectado eléctricamente a tierra. Se emplea en construcciones donde predomina la superficie frente a la altura.



La mayoría de las granizadas ocurren en verano.

## Granizadas

Las tormentas se forman en las nubes cumulonimbos, que producen rayos, truenos, rachas de viento, lluvias fuertes y hasta granizo. Y pueden clasificarse en:

- Ordinarias o unicelulares
- Multicelulares
- Supercelda

Aunque se sabe que dentro de una nube de tormenta se puede formar granizo, es complicado saber el tamaño que tendrá y si al caer se va a deshacer o no.

El granizo es una precipitación que se forma cuando los cristales de hielo son capturados por las grandes corrientes ascendentes y descendentes, que se extienden desde las bases hasta las cimas de los cumulonimbos entre 10 a 16 km de altura, aproximadamente. Al subir y bajar dentro de una nube, las piedras de granizo acumulan más agua en cada viaje hasta que al fin se hacen lo bastante pesadas para caer. Si se parte en dos, puede verse que está formada por capas concéntricas.

La mayoría de las tormentas de granizo ocurren durante el verano, entre los paralelos 20 y 50°, tanto en el hemisferio Norte como en el Sur.

En México, los daños más significativos se presentan en las zonas rurales, ya que se destruyen siembras, plantíos y, en ocasiones, la pérdida de animales de cría. En las regiones urbanas afecta viviendas, construcciones, alcantarillas y vías de transporte y áreas verdes, porque puede obstruir coladeras o desagües, generando inundaciones o encharcamientos.

Las principales granizadas se producen en el altiplano, que comprende la Sierra Madre Occidental, la Sierra Madre del Sur y algunas regiones de Chiapas, Guanajuato, Durango y Sonora. Comúnmente, las ciudades más afectadas son Puebla, Pachuca, Tlaxcala, Zacatecas y el Distrito Federal, entre mayo, julio y agosto.

El Servicio Meteorológico Nacional lleva a cabo el seguimiento continuo de núcleos convectivos que pueden generar nubes cumulonimbos de gran desarrollo vertical, las cuales pueden originar tormentas severas con descargas eléctricas, vientos fuertes, caída de granizo, inundaciones, deslaves, etcétera, con los consecuentes estragos para la población. Por lo tanto, se emiten avisos a corto plazo, con una validez de pronóstico de un par de horas, llamados Nowcasting, que dan seguimiento a las tormentas a nivel nacional y para el Valle de México.

## HELADAS Y NEVADAS

### Heladas

A la disminución de temperatura del aire a un valor igual o inferior al punto de congelación del agua de 0°C, se le conoce como helada. La cubierta de hielo es producida por la sublimación del vapor de agua sobre los objetos.

Las heladas se presentan, particularmente, en las noches de invierno por una fuerte pérdida radiactiva. Suelen acompañarse de una inversión térmica, donde pueden presentarse los valores mínimos, que van de un descenso de 2°C a más. Desde el punto de vista agroclimático es importante considerar a dicho fenómeno, dados sus efectos en el sector agrícola. Pero son relevantes, aunque en menor grado, las afectaciones a la salud de la población que es influenciada por las olas de frío.

En el norte y centro de la República Mexicana, durante los meses fríos del año que van de noviembre a febrero, se presentan temperaturas menores a 0°C debido al ingreso de aires polares continentales, generalmente secos, provenientes de Estados Unidos.

Las heladas más intensas están asociadas al desplazamiento de las grandes masas polares que, desde finales del otoño, se desplazan de Norte a Sur sobre el país.

En México, la distribución de las heladas se manifiesta, principalmente, en dos grandes regiones: la primera y más extensa está sobre las sierras Tarahumara, de Durango y Tepehuanes, que comprende a Chihuahua, Durango, Sonora y Zacatecas; y la segunda, se localiza en la parte centro del país e incluye a Michoacán, Estado de México, Distrito Federal, Tlaxcala, Puebla e Hidalgo, región que limita con el Sistema Volcánico Transversal. Otras áreas expuestas a bajas temperaturas se localizan en las sierras de San Pedro Mártir y de Juárez, Baja California. Una más cubre algunas porciones de San Luis Potosí y Zacatecas. En todas estas regiones existen cerca de 120 días con heladas. En cambio, las zonas costeras poseen ausencia de este fenómeno, como la vertiente del Golfo de México, el sur del río Pánuco y hasta la península de Yucatán, e incluso el istmo de Tehuantepec, además de la llanura del Océano Pacífico.

Las heladas pueden presentarse por:

**Advección.** Aparecen cuando una región es invadida por una masa de aire frío, cuya temperatura es inferior a 0°C. Este tipo de heladas se caracteriza por vientos con velocidades iguales o superiores a los 15 km/h y el gradiente de temperatura o variación con la altura es negativo, sin inversión té-

mica. Las áreas afectadas son extensas y la nubosidad no influye sobre la temperatura, que experimenta variaciones con la marcha horaria. Las plantas se enfrían por contacto.

**Radiación.** Se producen por el enfriamiento de las capas bajas de la atmósfera y de los cuerpos que en ellas se encuentran, debido a la pérdida de calor terrestre por irradiación durante la noche. Se genera por inversión térmica, es decir, una estratificación del aire en donde las capas más bajas son más frías y las capas más altas son más cálidas. Este tipo de heladas se produce en condiciones de viento en calma o escaso, ya que la ausencia de viento impide mezclar estas capas, y además con el cielo despejado, que permite una mayor pérdida de calor desde la superficie terrestre. La pérdida es mayor cuando las noches son más largas y el contenido de humedad del aire menor. En los suelos cubiertos de vegetación y en el fondo de los valles aumentan las posibilidades de que se den este tipo de heladas. En el caso de la cubierta vegetal, ésta actúa como aislante entre el suelo y la atmósfera, evitando que el calor del suelo se transmita con rapidez al aire; además disminuye la acumulación de



En México existen cerca de 120 heladas al año. Torreón, febrero 2012.

calor en el suelo al impedir el ingreso de la radiación solar. El relieve del suelo, por sus diversos accidentes, determina la dirección e intensidad del flujo de aire frío nocturno; si el suelo tiene pendiente, el aire frío (más denso) buscará niveles más bajos, donde se estacionará y continuará enfriándose, es por eso que el fondo de los valles es propicio para la formación de heladas.

**Evaporación.** Debidas a la evaporación de agua líquida desde la superficie vegetal. Suelen ocurrir por la disminución de la humedad relativa atmosférica, ya que el rocío sobre las plantas se evapora. El paso de agua líquida a su estado gaseoso requiere calor. Ese calor lo aporta la planta con su consiguiente enfriamiento.



Las heladas pueden ocurrir en otoño y primavera. Coahuila, 2012.

**Mixtas.** Son aquellas heladas que se producen simultáneamente por el vuelco de aire frío y la pérdida de calor del suelo por irradiación.

De acuerdo a los efectos visuales que este fenómeno causa las heladas pueden ser:

1. **Blancas.** Cuando la temperatura desciende por debajo de 0°C y se forma hielo sobre la superficie de las plantas. Este tipo de heladas se produce con masas de aire húmedo. Además, el viento calmo y los cielos despejados favorecen su formación.
2. **Negras.** En esta helada el descenso por debajo de 0°C no se acompaña de formación de hielo. Su designación responde a la visualización de la coloración que adquieren algunos órganos vegetales debido a la destrucción causada por el frío. Este tipo de heladas se produce cuando la masa de aire es seca. El cielo cubierto, semicubierto o la turbulencia en capas bajas de la atmósfera favorecen su formación.

Las heladas son frecuentes en invierno, pero ocurren también en otoño y primavera, conociéndose a las otoñales como tempranas y a las primaverales como tardías. En estas dos estaciones las plantas tienen una gran sensibilidad a los descensos bruscos de temperatura.

### Afectaciones de las bajas temperaturas a los vegetales

Como consecuencia de las temperaturas bajas las plantas sufren:

1. Debilitamiento de la actividad funcional, reduciéndose, entre otras cosas, las acciones enzimáticas, la intensidad respiratoria, la actividad fotosintética y la velocidad de absorción del agua.
2. Desplazamiento de los equilibrios biológicos, frenándose la respiración, fotosíntesis, transpiración, absorción de agua y circulación ascendente.
3. La muerte celular y la destrucción de los tejidos.

En general, la sensibilidad que un vegetal tiene al frío depende de su desarrollo. Los estados fenológicos más vulnerables son la floración y el cuajado de frutos. Además existen vegetales que han creado resistencia natural al frío a través de la concentración de los jugos celulares, ya que de esta manera desciende el punto de congelación, y mediante el endurecimiento, cuando va adaptándose a la nueva situación mediante cambios fisiológicos celulares.

### Métodos agrícolas de defensa

Se distinguen dos tipos para controlar las heladas en la agricultura: los métodos pasivos y los activos.

#### Pasivos

1. Evitar el cultivo de especies o variedades sensibles a las bajas temperaturas, en zonas en donde existen probabilidades y recurrencias de heladas.
2. Elegir variedades resistentes y de mayor altura, para evitar contacto de las flores con el aire frío cercano al suelo.
3. Las especies sensibles no deben implantarse en depresiones. Se debe preferir, en estos casos, los faldeos más cálidos.
4. Cuando exista una barrera, por ejemplo, una cortina cortaviento demasiado densa, el peligro de helada este aumenta hacia arriba de la pendiente.
5. Evitar la siembra de praderas, cereales, arbustos o viveros en la cercanía de un huerto frutal. Estos actúan como aislantes del flujo de calor del suelo, aumentando los riesgos de daño por heladas en cultivos bajos.
6. Evitar el laboreo excesivo del suelo. De ser así se forma una capa de suelo suelta, que actúa como aislante del calor que fluye desde las capas más profundas hacia la superficie.
7. Mantener el suelo libre de malezas, sin moverlo, y no dejar mucha paja u otro material sobre el suelo.

#### Activos

Son aquellos métodos aplicados al comenzar la helada y durante ella. El principio es muy simple: la helada se debe al frío, por lo tanto debemos evitar el enfriamiento aportando a la superficie una energía igual a la perdida, aunque también existen métodos que actúan directamente sobre la temperatura de las plantas.

Entre las formas de provocar el calentamiento del aire se encuentran:

1. La inundación de terrenos, que aumenta la capacidad calórica del suelo y su conductividad térmica.
2. La mezcla mecánica de aire, que fusiona, con ayuda de grandes hélices, el aire frío cercano al suelo con el aire cálido de las capas atmosféricas más altas.
3. La protección por interrupción de la radiación, consiste en evitar las pérdidas por radiación usando algún tipo de techo sobre la vegetación.



De la sensibilidad que tiene un vegetal al frío dependerá su desarrollo.

4. Las cortinas de humo, nubes o niebla. Considerando que el aire tiene mala conductividad térmica y que la transmisión de calor a través de él, a los objetos que rodea, es difícil, se ha ensayado transferir el calor directamente a las plantas.
5. El calentamiento del aire que rodea a la planta, que consiste en calentar el aire frío a través de quemadores de petróleo, 100 a 300 por hectárea. Otra alternativa son los agitadores de aire caliente o los quemadores a gas.
6. La aspersión de agua. El uso de aspersión aprovecha la liberación de calor que se produce al congelarse el agua (80 cal/g). Al colocar una pequeña capa de agua sobre una hoja que se está enfriando, la energía liberada al congelarse es aprovechada por la hoja. Si la aspersión se mantiene constante, durante el periodo de temperaturas bajas, hasta que el hielo se haya



Las nevadas son una forma de precipitación sólida.

fundido por acción del Sol, la temperatura de la hoja no descenderá de 0°C. Es importante tener en cuenta que si se trata de un cultivo con ramas finas, el peso del hielo puede romperlas. La aspersion debe comenzar en el momento que la temperatura baje de 1°C y debe mantenerse sin interrupción hasta después de la salida del Sol, de modo que el calentamiento de la atmósfera compense la absorción de calor producida por la fusión del hielo.

### **Nevadas**

La nevada es la caída o precipitación de copos de nieve y varía dependiendo del temporal y la localización, incluyendo latitud geográfica, elevación y otros factores que afectan al clima. En latitudes cercanas al Ecuador hay menos probabilidades de la caída de nieve. La latitud 35° es, a menudo, referida como el límite.

Se clasifica a las nevadas dependiendo de la tasa de caída de nieve, la visibilidad y el viento en:

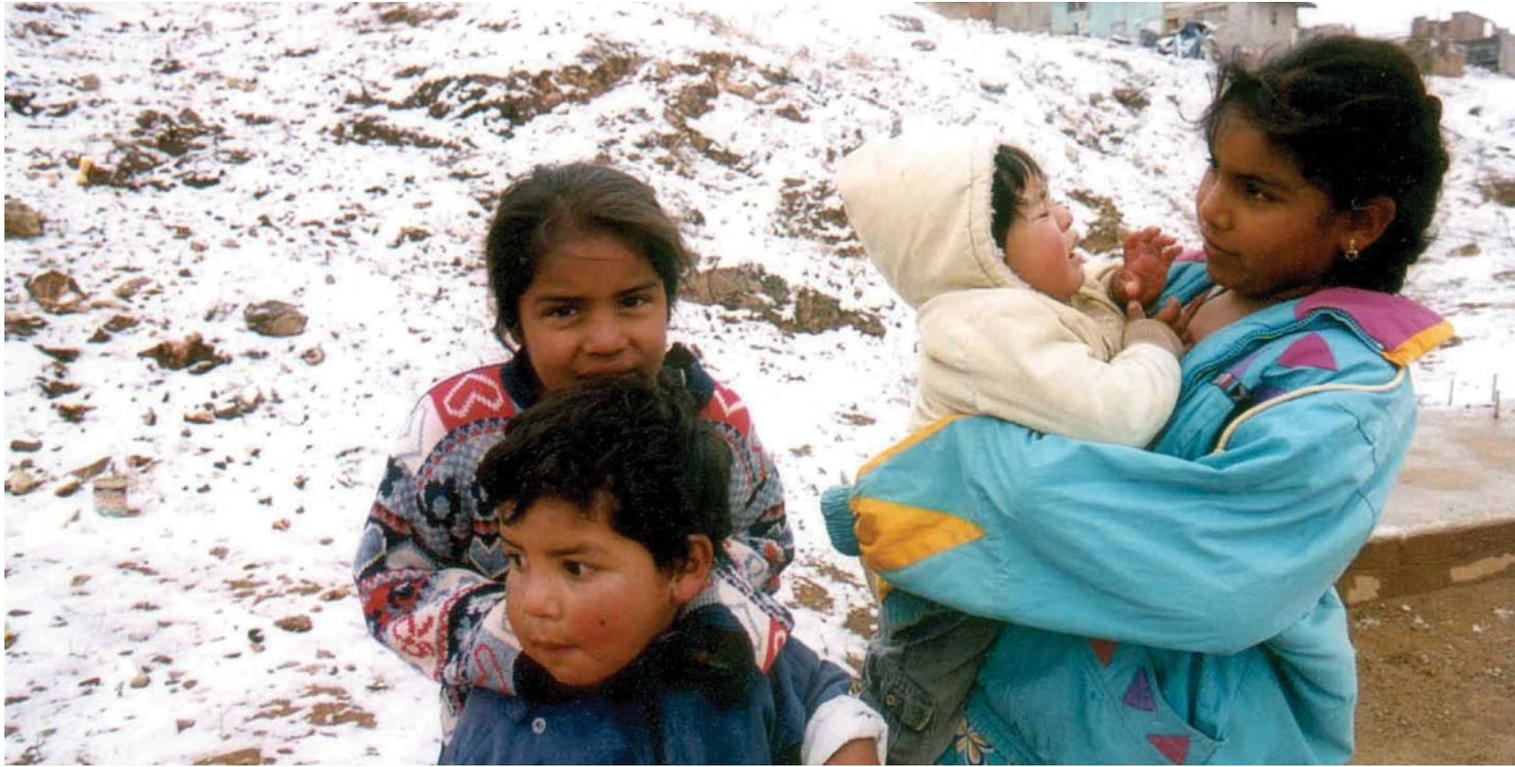
1. DÉBIL. Cantidades inferiores a 0.5 cm de espesor por hora, con visibilidad superior a 1 km.
2. MODERADA. Cae de 0.5 a 4 cm por hora, con una visibilidad que fluctúa entre 500 y 1,000 m.

3. FUERTE. Cae más de 4 cm por hora y la visibilidad es inferior a 500 m. Si se presentan vientos sostenidos superiores a 55 km/h (35 mph) se le considera tormenta invernal.
4. SEVERA. Caen más de 7 cm por hora; la visibilidad es inferior a 100 m y los vientos sostenidos superan los 70 km/h (45 mph).

Para que se presenten nevadas en el país se necesita de la formación de un sistema de baja presión con núcleo frío reflejada en todos los niveles de la atmósfera, así como el ingreso de humedad del Océano Pacífico hacia la porción norte del país, favorecida por la corriente en chorro, aunado a que la temperatura del aire en la altura disminuya rápidamente.

Las nevadas, también conocidas como tormentas de nieve, son una forma de precipitación sólida en forma de copos. Éstos se gestan por la aglomeración de cristales transparentes de hielo que se crean cuando el vapor de agua se condensa a temperaturas inferiores a la de solidificación del agua. La concentración de nieve tiene la forma de ramificaciones intrincadas de cristales hexagonales planos en una variedad infinita de patrones.

Los copos de nieve tienen diferentes formas y tamaños, que dependen de la temperatura y humedad de la atmósfera,



Las nevadas ocurren principalmente en el norte del país.

aunque todos presentan estructuras hexagonales, debido a cómo se agrupan las moléculas de oxígeno e hidrógeno al congelarse.

Los fenómenos meteorológicos que provocan las nevadas ocurren generalmente en invierno, y son las masas de aire polar y los frentes fríos, que en algunas ocasiones llegan a interactuar con corrientes en chorro, líneas de vaguadas y entrada de humedad de los océanos hacia la tierra. Estos fenómenos provocan tormentas invernales que pueden presentarse como lluvia, aguanieve o nieve.

Debido a la ubicación geográfica de México son pocas las regiones afectadas por las nevadas, siendo más acentuado este fenómeno en montañas o sierras, principalmente en invierno<sup>13</sup>.

Las nevadas principalmente ocurren en el norte del país y en las regiones altas del centro, y rara vez se presentan en el sur. Durante la estación invernal en las sierras de Chihuahua suceden, en promedio, más de seis nevadas al año, mientras que en algunas regiones al norte de Durango y Sonora, las nevadas tienen una frecuencia de tres veces al año.

<sup>13</sup> México tuvo un caso extraordinario de nevadas en el invierno de 1967, donde aproximadamente 50% del territorio nacional resultó afectado, alcanzando incluso al Valle de México.

### SISTEMAS FRONTALES, TORMENTAS INVERNALES Y NORTES

Un frente es la separación de dos masas de aire de distintas características atmosféricas, como temperatura, humedad, viento, densidad y presión. Los frentes se pueden extender por varios miles de kilómetros y se desplazan de Oeste a Este en el hemisferio Norte.

Los cuatro principales frentes son: frío, cálido, estacionario y ocluido, que se determinan a partir del movimiento de las masas de aire involucradas.

El frente frío se forma por la separación y desplazamiento de una masa cálida por una fría. Cuando el aire polar se encuentra con el tropical, por ser más denso, genera una cuña que eleva el aire cálido hasta reemplazarlo.

El símbolo del frente frío es una línea con triángulos de color azul, los cuales indican la dirección de su desplazamiento.

En el frente cálido la masa de aire tropical es la que reemplaza a la polar en la zona de transición, provocando que la temperatura aumente y genere nubes estratiformes, nimbostratos, altostratos, cirrustratos, cirrus, niebla y lluvias. Los frentes cálidos se identifican por medio de líneas rojas y por semicírculos rojos, los cuales indican su dirección de desplazamiento.

# FRENTES FRÍOS

## LOS FRENTES FRÍOS

En Meteorología, un frente es una franja de separación entre dos masas de aire de diferentes temperaturas. Se clasifica a los frentes como fríos, cálidos, estacionarios y ocluidos según sus características. La palabra *frente* se toma del lenguaje militar, dado que se asemeja a una batalla porque el choque entre las dos masas produce una actividad muy dinámica como tormentas eléctricas, ráfagas de viento y aguaceros.

El aire frío, siendo más denso, genera una "cuña" y se mete por debajo del aire cálido y menos denso.

El frente frío es una franja de inestabilidad que ocurre cuando una masa de aire frío se acerca a una masa de aire caliente.

Son generalmente guiados por corrientes de aire y viajan de Oeste a Este.

DESPLAZAMIENTO DEL FRENTE  
VIENTO EN ALTURA

$T^{\circ} = 15^{\circ}$   
AIRE FRÍO

ALTOCÚMULOS

FRENTE FRÍO

CUMULONIMBOS

SUPERFICIE FRONTAL

CÚMULOS

LLUVIAS FUERTES

Los frentes pueden verse afectados por formaciones geográficas como montañas y grandes volúmenes de agua.

$T^{\circ} = 30^{\circ}$

AIRE CALIENTE

Los frentes ocluidos se forman, generalmente, alrededor de áreas de baja presión y cuando éstas están debilitándose.



## FRENTE OCLUIDO

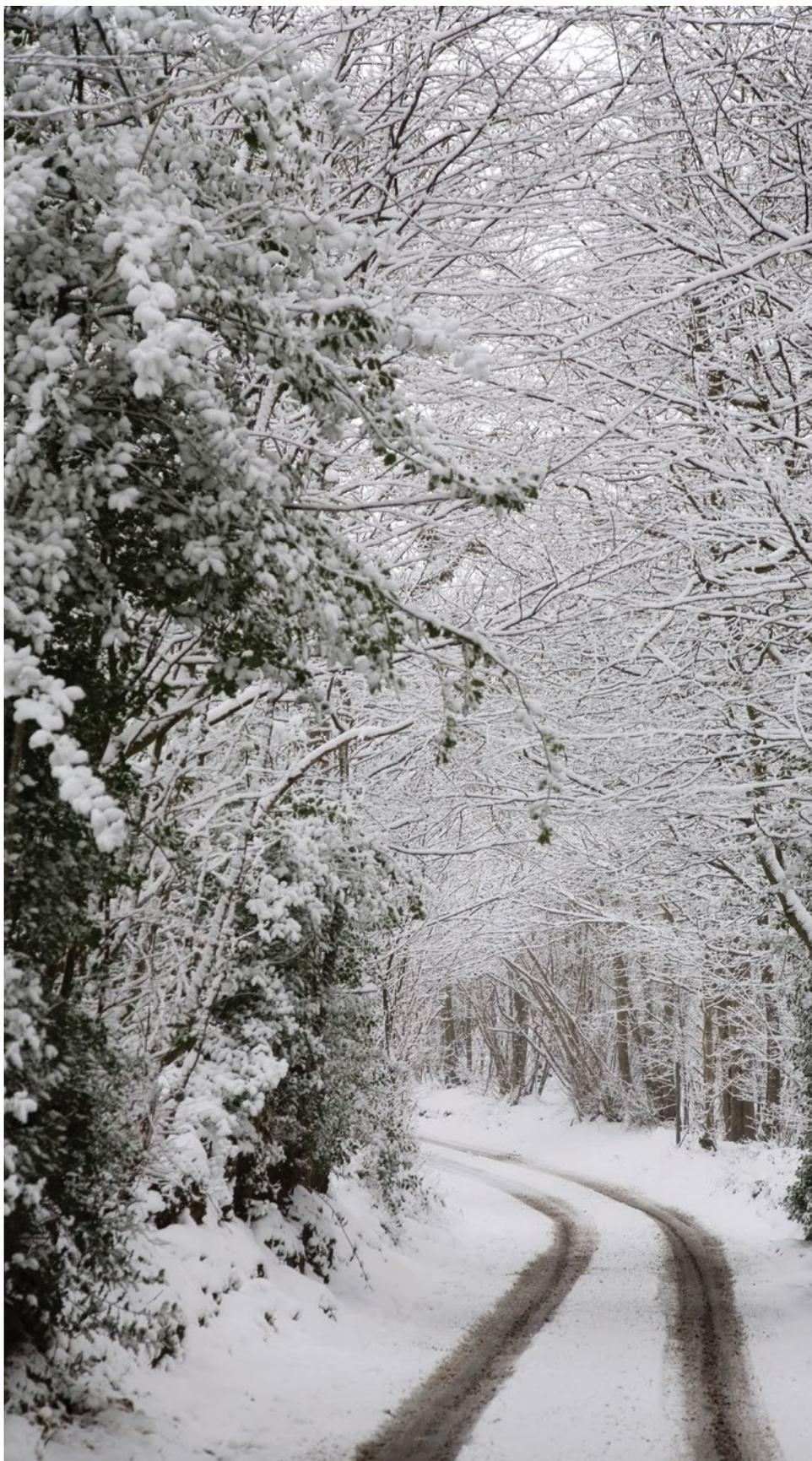
Un frente ocluido se forma donde un frente caliente móvil más lento es seguido por un frente frío con desplazamiento más rápido. El frente frío con forma de cuña, alcanza al frente caliente y lo empuja hacia arriba. Los dos frentes continúan moviéndose uno detrás del otro y la línea entre ellos es la que forma el frente ocluido.

Generalmente, con el paso del frente cálido la temperatura y la humedad aumentan, la presión baja y aunque el viento cambia no es tan pronunciado como cuando pasa un frente frío.



## FRENTE CÁLIDO

Se llama frente cálido a la parte frontal de una masa de aire tibio que avanza para remplazar a una masa de aire frío



Las tormentas invernales son sistemas de baja presión.

Cuando un frente frío se traslada rápidamente hacia el Este y alcanza al cálido se presenta un frente ocluido. Este sistema genera nubosidad de tipo estratos, lluvia ligera y niebla. Se presentan con mayor frecuencia en el norte de Estados Unidos durante los meses de invierno. Los frentes ocluidos se identifican por los símbolos alternados de triángulos y semicírculos sobre una línea morada, y éstos siempre apuntan en la dirección del movimiento frontal.

Cuando la zona de transición de una masa de aire no avanza ni se retira, se trata de un frente estacionario. Este se desplaza a menos de 9 km/h y favorece la aparición de lluvias ligeras, nieve, cielo nublado, vientos fuertes y chubascos.

Los frentes estacionarios se identifican con una línea que alterna triángulos azules y semicírculos rojos en lados opuestos.

### **FRENTE ESTACIONARIO EN EL GOLFO DE MÉXICO**

La masa fría que acompaña a los frentes genera un fenómeno en nuestro país llamado Norte. Es un evento de tiempo extremo caracterizado por fuertes vientos, que van de 35 km/h hasta superiores a 100 km/h en superficie, y corren de Norte a Sur sobre el Golfo de México y sus planicies costeras. Los Nortes también reciben el nombre de Tehuano o Tehuantepecano en la región del Istmo y el golfo de Tehuantepec.

Las tormentas invernales son sistemas de baja presión que se forman en las capas medias y altas de la atmósfera, en los meses de invierno en México. Son vórtices muy grandes, que al girar, producen efectos importantes en el estado del tiempo, como vientos fuertes, nubes como estratos, cúmulos, cirrus, etcétera. También generan descenso de temperatura, lluvias, nevadas, granizo, lluvia engelante y trozos de hielo.

Estas tormentas se acompañan, en las capas más altas, por una corriente en chorro, que es similar a un río de aire que, incluso, permite a los aviones ahorrar combustible cuando van en la dirección de la corriente. Mientras más intensa sea, la tormenta invernal que le acompañe también aumentará su fuerza.

Las tormentas invernales que alcanzan a México, generalmente se forman en el centro de baja presión, ya sea en el Océano Pacífico, en el noroeste de Estados Unidos de América o en el suroeste de Canadá, para desplazarse hacia la península de Baja California y de ahí extender su influencia hacia resto del territorio nacional.

La frecuencia de estos sistemas es variable, y no siempre alcanzan o se forman en México incluso durante años. Sin em-

bargo, las observaciones realizadas por el SMN son que el promedio de incidencia por año es de tres sistemas, aunque en lo que va de 2015 se han formado nueve tormentas invernales. De ahí la importancia de la información oportuna y confiable sobre el estado de la atmósfera, que sirve de instrumento para reducir los riesgos por desastres hidrometeorológicos.

### **MAREA DE TORMENTA**

En su mayoría, las olas del océano se crean por la acción del viento sobre la superficie del mar. Cuanto más fuerte sopla y por más tiempo, más grandes son las ondas. Con frecuencia, la energía generada es tan importante que las olas se propagan cientos de kilómetros, incluso cuando el viento ya está en calma.

Existen dos tipos de mar: de viento y de fondo. El primero, también llamado de leva, es un oleaje levantado localmente por el viento. El segundo, es un oleaje no originado por el viento reinante. Este puede ser el resultado de la acción de los vientos soplando sobre otra región o de vientos que han cesado de soplar.

Las tormentas levantan olas con una longitud de onda muy diversa, que se propagan en distintas velocidades. En aguas profundas, las ondas más largas se extienden más rápido que las de corta longitud. Resulta, incluso, que las olas pueden preceder a las tormentas. La llegada de olas largas, de poca altura, a veces es indicio de la proximidad de una tormenta.

Los mares nunca están en reposo, ya que la atmósfera está en movimiento y los vientos empujan sus aguas superficiales.

Las principales fuerzas motrices de las corrientes marinas tienen su origen en la acción recíproca que se ejerce entre el océano y los sistemas de circulación atmosférica. Y la energía necesaria para iniciar los movimientos de la atmósfera y los mares procede de la radiación solar.

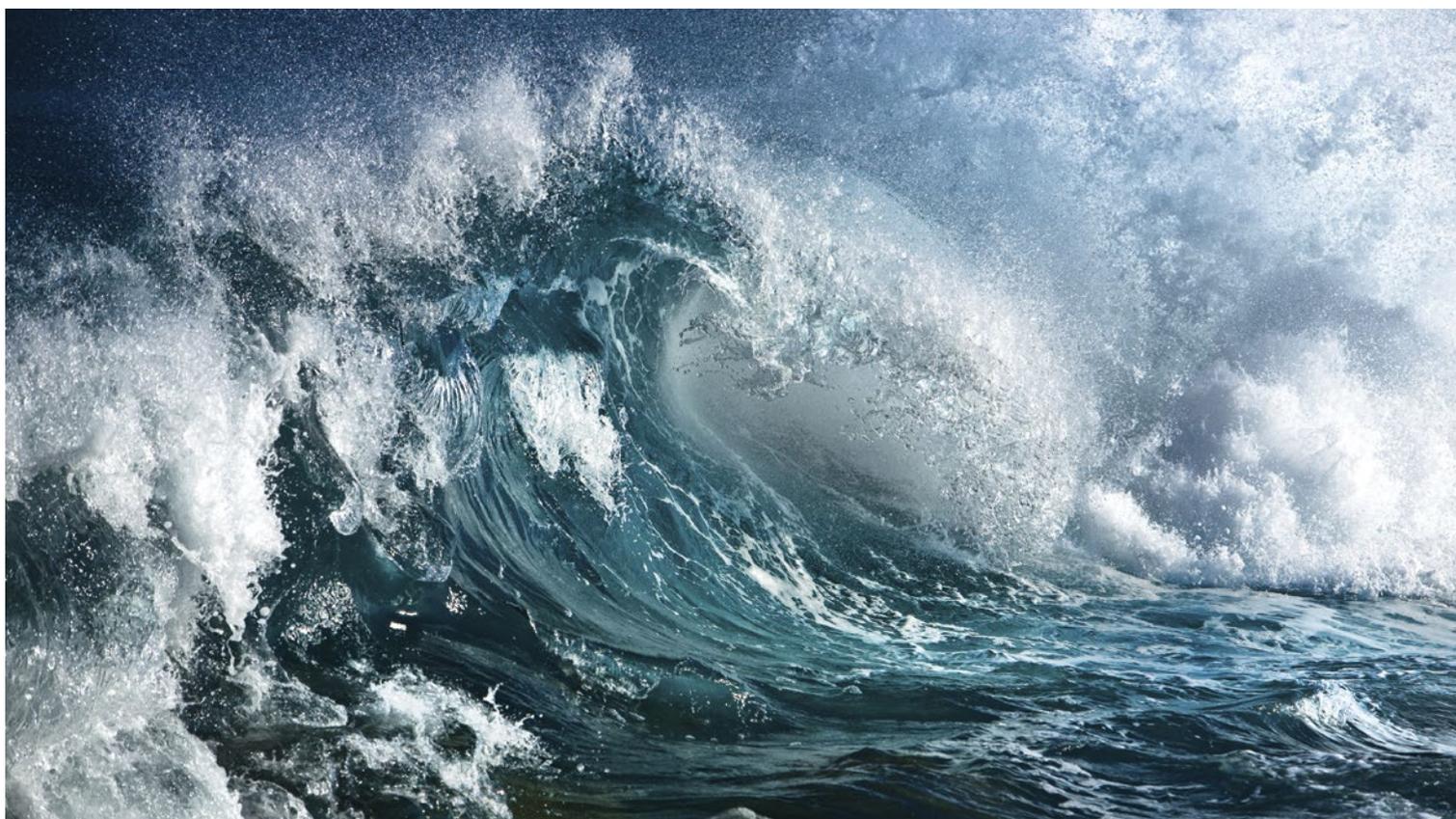
El calentamiento del océano en las cercanías del Ecuador y su enfriamiento en las zonas polares originan diferencias de temperatura y, por acción de la gravedad, se desarrollan corrientes de convección donde las aguas frías y densas empujan a las más cálidas y menos densas hacia la superficie. Y al igual que los vientos, la dirección de las corrientes oceánicas es afectada por la rotación de la Tierra.

### **ORIGEN DEL MAR DE FONDO Y EFECTOS EN EL LITORAL DEL PACÍFICO SUR MEXICANO**

A mediados de abril, aproximadamente, el litoral del Pacífico sur mexicano es afectado por el aumento del nivel del mar,



Cuanto más fuerte sopla el aire y por más tiempo más grandes son las olas.



Las olas más largas se extienden más rápido.

marejadas y la reducción de playas, ante la llegada de una corriente marina que desplaza grandes masas de agua hacia el litoral. Este fenómeno va desde Chiapas hasta llegar, incluso, a la península de Baja California o las costas de Sinaloa.

Paralelamente y a uno y otro lado de la zona ecuatorial soplan los vientos alisios, formando las corrientes de superficie Nor-ecuatorial y Sur-ecuatorial. Éstas, al transportar agua caliente, provocan un descenso del nivel del mar en el oriente del Pacífico ecuatorial y tropical, mientras acumulan enormes cantidades del lado occidental. Este aumento es paulatino, sin embargo, cuando no puede incrementarse por más tiempo, ni desfogarse hacia el Norte por la Corriente del Kuroshivo o hacia el Sur por la Corriente Australiana, se forman olas submarinas llamadas Ondas Kelvin. Cuando estas ondas siguen un camino de retorno de Asia a América, entre las dos corrientes ecuatoriales, toman el nombre de Contracorriente Marina Ecuatorial.

Cuanto más intensos son los alisios mayor es el volumen de agua del Pacífico, que va del Este hacia el Oeste, y mayor será la cantidad de líquido cálido que retorne como Contracorriente Marina Ecuatorial, provocando el aumento de humedad apenas llega a las costas del Pacífico mexicano.

El arribo de las Ondas Submarinas Kelvin favorece el engrosamiento superficial del agua cálida, la reducción de playas, un incremento en el nivel del mar y marejadas. Y dado que las marejadas tienen su origen en las corrientes marinas, apenas aparecen se sabe que la Contracorriente Marina Ecuatorial ha llegado a las costas mexicanas.

Las marejadas provocadas por la Contracorriente Marina Ecuatorial, pueden incrementar su intensidad por la Zona Intertropical de Convergencia y por los ciclones tropicales, por eso el análisis climatológico, meteorológico y oceanográfico es más que esencial para determinar sus posibles efectos y emitir los avisos oportunamente .

Las marejadas no son continuas ni generalizadas, sino aisladas y por periodos de tiempos variados. En ocasiones forman una sola e inmensa marejada en una amplia zona y rompen con violencia en las playas. Además, cuando coinciden en el océano con la apertura de las barras se forman remolinos.

El nivel del mar elevado perdura hasta mediados del otoño, cuando la Contracorriente Marina Ecuatorial se desplaza hacia el Sur, siguiendo al Sol.

### OLEAJE CICLÓNICO

Los fuertes vientos de los ciclones tropicales crean grandes olas, que se mueven a una velocidad media de más de 1,500 km por día y que es superior a la del desplazamiento del mismo ciclón. Por eso la llegada de un fuerte mar de fondo puede indicar su proximidad y dirección.

En las zonas costeras, los mayores impactos de un ciclón tropical se ocasionan por marea, oleaje, vientos fuertes y lluvias intensas. Sin embargo, el viento y la marea están concentrados dentro de unos pocos kilómetros del centro del ciclón. En tanto que el oleaje es más grande del lado derecho del ojo del huracán.

### MAREA DE TORMENTA

La disminución de la presión atmosférica del centro del ciclón tropical y los vientos sobre la superficie del mar originan un ascenso del nivel medio, conocido como marea de tormenta que puede provocar inundaciones y el impacto de las olas en las zonas bajas continentales cercanas al litoral.

Cuando al ascenso y descenso diario del nivel del mar, producto de la marea ordinaria (astronómica), se combinan

con la de la tormenta, es mayor la sobreelevación del nivel medio del mar.

Cuando el ciclón se ha alejado, el nivel desciende y se restablecen las condiciones normales en el océano. La marea de tormenta es más intensa cuando los vientos se dirigen hacia la costa y los vientos del ciclón tropical, que tienen dirección de tierra al océano, producen un descenso del nivel medio del mar.

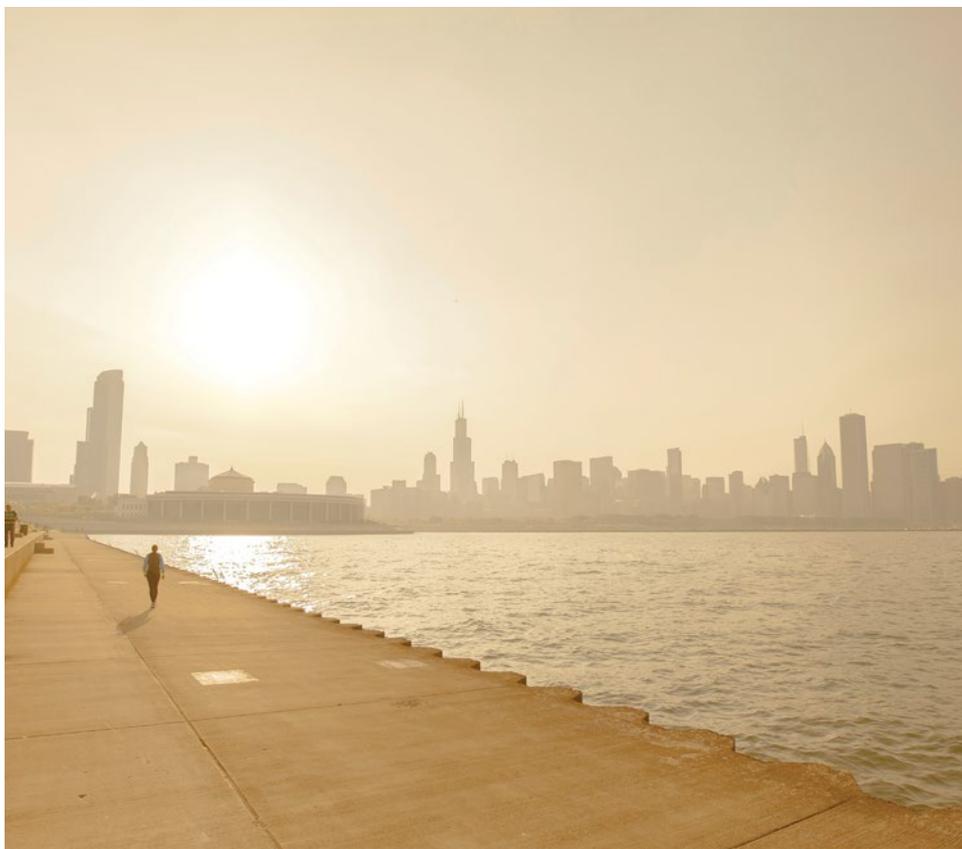
Para calcular la marea de tormenta es necesario conocer la intensidad del viento del ciclón en el mar, así como la configuración del fondo marino y del litoral.

En el Pacífico, la plataforma continental o fondo marino tiene una gran pendiente, por lo que la marea de tormenta deja a su paso menores daños, a diferencia de la plataforma continental del Golfo de México y del mar Caribe que presenta muy poca pendiente.

La marea de tormenta se puede calcular a partir de la magnitud y dirección de los vientos que actúan en la superficie del mar. Estos vientos son casi nulos en el centro, luego aumentan radialmente hasta alcanzar un máximo (a una distancia del orden de 50 km del ojo del sistema),



Los vientos de los ciclones tropicales crean grandes olas.



Cuando ocurre marea de tormenta, la forma de la costa puede incrementar la sobreelevación del nivel medio del mar.

para que, después, disminuyan gradualmente a medida que se alejan de dicho centro.

Los vientos son más fuertes cuando la presión del ciclón tropical es menor, por eso los huracanes categoría 5 producen una marea de tormenta mayor que los de categoría 1 y estos a su vez mayor que una tormenta tropical y que una depresión.

Los vientos se dirigen hacia el centro del ciclón en un movimiento contrario a las manecillas del reloj, formando un ángulo de aproximadamente 30° respecto a la dirección tangente de círculos concéntricos y que señalan su distancia del ojo del huracán. Cuando la dirección de los vientos apunta hacia una bahía, por la forma de la costa es mayor la sobreelevación del nivel medio del mar.

### **LÍNEA DE TURBONADA Y LÍNEA SECA**

#### **Línea de turbonada**

La línea de turbonada se forma por lo general a lo largo o delante de los frentes y en condiciones de atmósfera inestable. Se caracteriza por un aumento en la velocidad del viento en un periodo de tiempo muy corto, tiene una duración de unos pocos minutos e inmediatamente la intensidad

del viento disminuye. Puede estar acompañada de fuertes lluvias, granizo y relámpagos.

Las rachas de estos vientos puede superar los 100 km/h, el cielo se ve cubierto por una espesa capa nubosa y hay una disminución en la temperatura. En la imagen de un radar se observan como líneas estrechas, generalmente arqueadas, que apuntan al lugar hacia el que se dirigen. En las aguas del Golfo de México es donde se registran con mayor frecuencia.

#### **Línea seca**

Es la frontera entre una masa de aire húmedo y otra de aire seco. Típicamente se sitúa de Norte a Sur a través de los estados centrales y del sur de las Altas Llanuras de Estados Unidos, durante la primavera y principios del verano, donde separa el aire húmedo procedente del Golfo de México (al Este) y el aire seco desértico procedente de los estados del suroeste (al Oeste). Este fenómeno durante el día se desplaza hacia el Este y durante la noche regresa al Oeste.

El paso de una línea seca típica provoca una repentina caída de la humedad, aclarando los cielos, y un viento que cambia de Sur o Sureste a Oeste o Suroeste y pueden seguir polvo en suspensión y un ascenso de las temperaturas, especialmente si la línea seca pasa durante el día. Estos cambios ocurren en orden inverso cuando la línea seca se retira al Oeste. Además de favorecer las condiciones de tiempo severo y, en ocasiones, la formación de tornados, especialmente cuando comienza a moverse hacia el Este.

### **ISLA DE CALOR, SENSACIÓN TÉRMICA Y OLA DE CALOR**

#### **Isla de calor**

Uno de los efectos más evidentes de la alteración climática inducida por la urbanización es el fenómeno conocido como Isla de Calor Urbana (ICU), que se caracteriza, principalmente, por la presencia de un ambiente térmico más cálido en ciudades o zonas urbanas densamente construidas, respecto al ambiente térmico del medio rural que la rodea, así como por una disminución de la humedad del aire y velocidad del viento.

La ICU tiene un impacto negativo sobre el organismo humano, manifestándose en el estado anímico, presentando menor rango de tolerancia, incremento de estrés y mayor cantidad de casos de enfermedades, entre otros.

En los espacios urbanos con áreas verdes, la isla de calor queda atenuada en función de las dimensiones de la masa vegetal, también llamadas células o islas de frescor. Así que, entre menos áreas de vegetación, hay mayores valores de temperatura, menos sombra y humedad.

La diferencia de temperaturas que se presenta de un lugar a otro, se atribuye a diversas causas, entre las que se encuentran el uso masivo de automóviles, la tala de árboles y la desaparición de la corteza vegetal. Este cambio de suelo provoca que ya no funcione como un sumidero de dióxido de carbono o recarga de mantos acuíferos, que son los que controlan la humedad y la convección que se da en la atmósfera.

Durante la noche, el proceso que da lugar a la isla de calor es la diferencia de la rapidez del enfriamiento nocturno de los materiales de los que está hecho el suelo de la ciudad, respecto al suelo rural circundante; sin embargo, durante el día, los materiales en las ciudades se calientan de forma progresiva e incluso más rápidamente que los suelos con vegetación o desnudos de las zonas rurales, esto por la mayor captación de radiación solar de las construcciones urbanas lo que da como resultado la mayor liberación de calor sensible hacia el aire urbano superficial en las primeras horas de la tarde.

La ICU se presenta cuando el aire está en calma y el cielo despejado, ya que con cielos nublados la pérdida de calor por radiación nocturna es menos acentuada —debido a la absorción de radiación de onda larga del suelo por la presencia del vapor de agua— y con presencia de viento, ya que funciona como un mecanismo de transporte de calor.

La isla de calor tiene como consecuencia aumentos de temperatura e incrementos en el consumo de energía eléctrica, por los sistemas de refrigeración y aire acondicionado, produciendo gases contaminantes como dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno.

Además, se favorece el aumento de la contaminación ambiental, ya que las altas temperaturas urbanas funcionan como catalizador de las reacciones de los gases de combustión presentes en la atmósfera y, por otra parte, el aumento de consumo de energía hace que las plantas generadoras liberen mayores cantidades de gases de combustión como monóxido y bióxido de carbono, óxidos de nitrógeno y de azufre, vapor de agua y metano, los cuales son responsables del calentamiento global o efecto invernadero y de la lluvia ácida.

Es claro que la preocupación por estos fenómenos nace de su asociación con incrementos en el desarrollo de enfermedades, decremento en el rendimiento laboral y académico de la sociedad, esto directamente asociado a la falta de un ambiente comfortable.

### Sensación térmica

En Meteorología se utiliza el término sensación térmica para expresar de manera exacta la temperatura que siente una persona, la cual en muchos casos resulta muy diferente a la temperatura ambiente registrada por los instrumentos.

El concepto de sensación térmica también se utiliza para cuantificar la dificultad o facilidad del organismo para disipar el calor producido por el metabolismo interno en defensa de unas condiciones térmicas adversas.

La cuantificación de estas condiciones implica la medición de los parámetros climáticos que originan esta sensación. Estos parámetros son la temperatura ambiente y la humedad, los cuales inciden sobre la capacidad de pérdida o ganancia de calor del cuerpo humano; y a éstas hay que



La isla de calor favorece el aumento de la contaminación.



Las olas de calor suelen ocurrir en primavera y verano.

añadir la influencia del viento que contribuye a una mayor o menor sensación de incomodidad. En este proceso, la humedad tiene mayor incidencia que la temperatura.

La percepción de la sensación térmica influye en las personas en lo fisiológico, lo psicológico y en su comportamiento. La influencia en el comportamiento se manifiesta, consciente o inconscientemente, con el propósito de alterar o cambiar las condiciones térmicas existentes entre su cuerpo y el ambiente; por ejemplo: un cambio de actividad o posición, realización de aberturas o cerramiento de ventanas y/o la colocación de dispositivos para sombreado, colocación y operación de controles de sistemas de ventilación, calentamiento y/o refrigeración, modos de vestir y hasta la programación de las actividades conforme al clima.

Si un cambio en las condiciones ambientales no es comfortable, las personas buscarán un lugar en donde la sensación térmica sea agradable y se pueda mantener el equilibrio del cuerpo.

Tanto para la estimación de la temperatura efectiva como para la fijación de la temperatura de confort existen diferentes procedimientos que permiten calcular sus índices, que han sido desarrollados con fundamento en la teoría del balance térmico del cuerpo humano y del ambiente en régimen estacionario. La idea es que la sensación de bienestar térmico está ligada al trabajo que el sistema termorregulador humano tiene que desarrollar para mantener el equilibrio. Esto significa que, cuanto mayor sea el esfuerzo del sistema para mantener la temperatura interna del cuerpo, mayor será la sensación de disgusto, y cuanto menor sea el esfuerzo para mantener la temperatura interna del cuerpo, mayor será la sensación de confort.

### Ola de calor

Se define como un periodo excesivamente cálido, en el que las temperaturas máximas y mínimas superan por lo menos durante tres días consecutivos y, en forma simultánea, los valores que dependen de cada localidad.

Suele ocurrir durante la primavera y verano por efecto de un sistema de alta presión posicionado sobre la República Mexicana que origina corrientes de viento descendente en niveles altos (subsistencia) con características de aire cálido y seco.

Este efecto se debe a un sistema de alta presión semipermanente sobre el norte del país, con características de aire tropical continental, generalmente seco, desplazándose lentamente hacia el sureste de la República. Las temperaturas que se han alcanzado han llegado hasta 48°C en Aldama, Tamaulipas (mayo, 2008); 43°C en Mérida, Yucatán, y en Tecate, Baja California: 45.5°C (agosto, 2009), y en Tacubaya, Distrito Federal: 33.9°C (mayo, 1998).

Durante el verano, el sistema de alta presión semipermanente puede estar asociado al evento de canícula.

En caso de que el sistema de alta presión se desplace sobre el Golfo de México, produce viento de componente sur sobre las costas del litoral conocido como surada, por lo que el aire es muy cálido y húmedo y el viento fluye de dirección Sur.

El golpe de calor es un término empleado por instituciones de Salud, que explica las afectaciones en la población por hipertemia. Adultos mayores, niños muy pequeños, enfermos y obesos son la población de más alto riesgo para las enfermedades derivadas de la ola de calor. ❀



## CAPÍTULO 6 CLIMATOLOGÍA

### TIEMPO Y CLIMA

Para iniciar es importante recalcar la diferencia entre tiempo y clima, en el sentido atmosférico.

Cuando se escucha o se lee: “El Servicio Meteorológico Nacional informa que para esta tarde en el Valle de México se espera la presencia de lluvias fuertes acompañadas de tormentas eléctricas y caída de granizo”, se está refiriendo al tiempo, es decir, a las condiciones meteorológicas que pueden durar varias horas o hasta días.

Por otro lado, cuando se dice que una ciudad costera del sur de México será: “calurosa casi todo el año”, estamos hablando del “clima de esa ciudad”, es decir, las condiciones promedio del lugar por periodos de tiempo largos.

Aunque existe varias definiciones de clima, se puede entender en términos generales como:

El estado promedio del tiempo y, más rigurosamente, como una descripción estadística del tiempo atmosférico en términos de los valores medios y de la variabilidad de las magnitudes correspondientes durante periodos

que puedan abarcar desde meses hasta millares o millones de años<sup>1</sup>.

El periodo de promedio es de 30 años, según la definición de la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

La Climatología es la rama que se encarga del estudio del clima, sus variaciones y extremos y su influencia en varias actividades, sobre todo —aunque no exclusivamente— en los ámbitos de salud, seguridad y bienestar humanos<sup>2</sup>.

Si bien la Climatología se encarga de estudiar el comportamiento de las variaciones del tiempo en escalas de periodos largos, las interacciones que ocurren en el sistema climático ocurren en varias de éstas.

Vistas desde un punto espacial existen desde la microescala —abarcando características de áreas muy pequeñas, por ejemplo: casas y terrenos de poca extensión— hasta el

<sup>1</sup> Baede, A. (ed), Van der Linden, P., Verbruggen, A. (Co-ed), “Anexo II Glosario de Términos”, *Informe de Síntesis del Cuarto Informe*, IPCC, 2007.

<sup>2</sup> Santamaría J., “Forzamiento radiactivo y cambios químicos en la atmósfera”, *Guía de prácticas Climatológicas*, OMM, Ginebra, *Revista Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, Volumen 101, No. 1, tercera edición, 2011, pp. 149-173.



En nuestro planeta coexisten diversos tipos de clima.

nivel macro, comprendiendo vastas regiones geográficas y la circulación atmosférica global.

Desde el punto temporal, aunque los intervalos tiempo de variación de las variables atmosféricas van de segundos hasta milenios, la Climatología sólo se encarga de aquellos que van desde décadas a cientos de miles de años<sup>3</sup>.

### FACTORES CLIMÁTICOS

En nuestro planeta coexisten diversos tipos de clima que caracterizan varias regiones, éstos son el resultado de la interacción de diferentes variables conocidas como Factores Climáticos, los cuales influyen en las temperaturas y precipitaciones de cada región:

1. **Latitud.** Según la distancia al Ecuador varía la temperatura y la precipitación, debido a que la radiación solar que incide sobre la superficie de la Tierra se comporta de la misma manera. Las regiones del planeta donde los rayos solares inciden de forma más perpendicular (Ecuador) a la superficie terrestre reciben mayor cantidad de energía, adquiriendo así mayor temperatura. Lo contrario sucede hacia los polos donde la radiación solar que incide presenta una mayor inclinación, cruzando una capa de la atmósfera más gruesa que la del Ecuador, alcanzando menor energía en la superficie y como consecuencia regiones más frías.
2. **Relieve.** Las lluvias orográficas son influencia de las montañas, que obligan a ascender a las masas de aire, lo que provoca el enfriamiento, saturación, condensación y precipitación en el lado de barlovento (efecto Foehn). Además, entre más altura sobre el nivel medio del mar, menor será la temperatura.
3. **Distancia del mar (continentalidad).** Debido a que los océanos se calientan y enfrían más lentamente que la tierra, las zonas costeras son más cálidas y húmedas que tierra adentro.
4. **Corrientes marinas.** Dependiendo el tipo de corriente cálida o fría, ésta puede incrementar o reducir la temperatura de una región.

### ELEMENTOS CLIMÁTICOS

Los elementos climáticos son aquellas variables que modifican el tiempo meteorológico, como la precipitación y

<sup>3</sup> Ahrens, C. D., *Meteorology today: An introduction to weather, climate, and the environment*, 9ª ed., Belmont, CA, 2009, Brooks/Cole.

la temperatura. La combinación con otros elementos generan propiedades que permiten describir el tiempo o el clima en una región para un determinado periodo. Los más utilizados en el área de la Climatología son la temperatura del aire (máxima, mínima y promedio), la precipitación, humedad, el viento, presión atmosférica, evaporación e insolación. Además de las propiedades de la superficie terrestre (topografía, hidrología, vegetación, etcétera), de los océanos y de la criósfera también se utilizan para describir el clima y su variabilidad<sup>4</sup>.

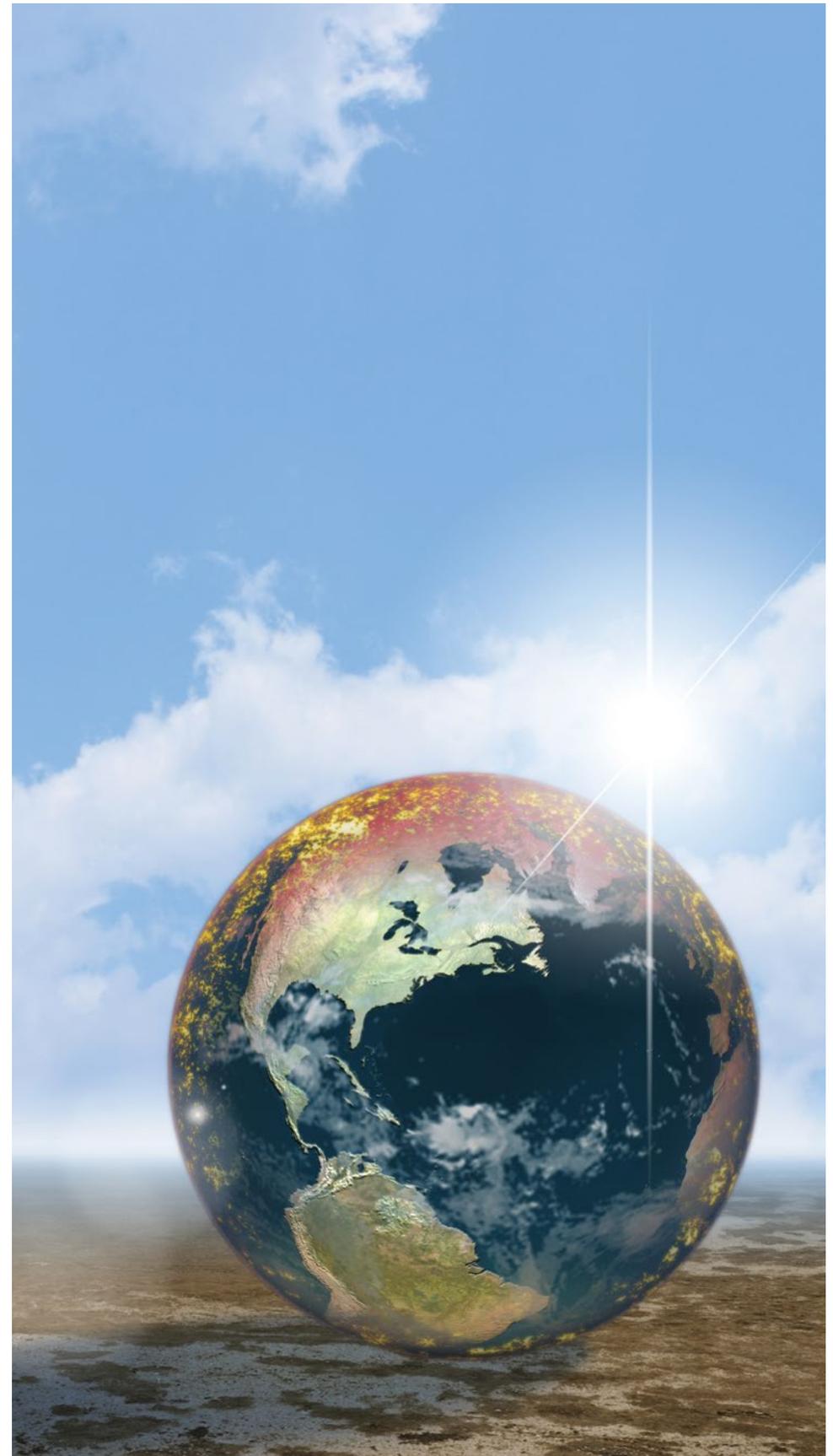
### SISTEMA CLIMÁTICO

La idea de estudiar al clima como un sistema surgió en los años setenta, como resultado de la conjugación entre la naciente preocupación por el medio ambiente en el siglo XX y la consolidación de la Teoría General de los Sistemas, la cual surge como un modelo de conocimiento con la capacidad suficiente para analizar con rigor y eficacia los fenómenos naturales. Concibiéndose al clima como un conjunto de elementos interrelacionados por procesos de retroalimentación que determinan su funcionamiento. Esta visión del clima se convirtió en uno de los principales centros de interés de la Climatología actual. La cual se centra en el estudio y comprensión del funcionamiento de este sistema, teniendo como objetivo final la construcción de modelos matemáticos capaces de reproducir las complejas sinergias del clima, para predecir el estado futuro de los elementos climáticos.

Un sistema es un conjunto de elementos organizados interdependientes o que interactúan entre sí, por medio de conexiones regulares y definidas, formando un todo que puede ser identificable y distinto. Los elementos del sistema son todos los componentes físicos que operan las funciones, mientras que, los procesos son las operaciones de los componentes. Los sistemas tienen entradas de energía o materia externas al sistema, y éstas al ser sometidas a procesos dan como resultado salidas, ya sea de energía o materia. Cuando las salidas vuelven al sistema se les denomina retroalimentación (*feedback*). Esta propiedad permite que los sistemas tengan control de sus procesos.

Los sistemas pueden clasificarse en:

<sup>4</sup> Santamaría J., *Guía de prácticas Climatológicas, op. cit.*, 2011.



Los elementos climáticos son variables que modifican el tiempo meteorológico.

**Aislados.** No hay intercambio de energía ni de materia. Normalmente se encuentran bajo condiciones de laboratorio y no en la naturaleza.

**Cerrados.** Únicamente hay intercambio de energía con su entorno o medio ambiente.

**Abiertos.** Se presenta un intercambio de energía y materia con su entorno. Por lo que son los más abundantes en la naturaleza.

**En Cascada.** Es una cadena de subsistemas abiertos, donde la salida de un subsistema es la entrada del siguiente. Estos son muy comunes en la naturaleza. Un ejemplo: el ciclo del agua, donde una de las entradas es la energía proveniente del Sol que, como única fuente de energía del sistema, es fundamental ya que ésta circula por los diferentes componentes del sistema y después es devuelta al espacio. Otras entradas son los factores astronómicos y geográficos. Las salidas son la diversidad de climas en el planeta.

Los elementos del clima son los resúmenes estadísticos de las registros de las variables meteorológicas, por ejemplo lluvia acumulada, temperatura media, viento, presión barométrica, nubosidad y humedad.

La Teoría General de los Sistemas (TGS) expone que cualquier cambio en alguno de los miembros de un sistema afectará al resto, lo que permite la idea de la totalidad y no de sumatividad, es decir, a un mismo efecto pueden responder distintas causas, debido a las interconexiones entre los miembros. La definición del sistema climático fue dada por la OMM a través del Programa Global de Investigación Atmosférica (GARP) en 1975. El cual está integrado por cinco componentes fuertemente acoplados:

1. **Atmósfera:** Es el componente central del sistema ya que en ésta se presentan los fenómenos meteorológicos y climatológicos, es el componente más inestable y



La principal fuente de energía del sistema climático es el Sol.



La criósfera regresa la mayor parte de la radiación solar al espacio.

donde se da la mayor transferencia de calor en el planeta, además es fundamental para el control de la energía solar que entra y sale del sistema.

2. **Hidrosfera:** Está compuesta por el agua líquida de la Tierra, en los océanos se almacena la mayor parte de agua del planeta (97%), y éstos son la llave de la física del sistema climático. Debido a su enorme capacidad para almacenar y liberar calor, en escalas de tiempo que van de meses a siglos, juegan un rol determinante en la composición de la atmósfera a través de los intercambios de gases y partículas.
3. **Criósfera:** Está compuesta por el hielo cercano a la superficie de la Tierra, y representa cerca del 6% de la

superficie terrestre. Esta conformado por la Antártida, Groenlandia, glaciares de las montañas, permafrost de latitudes altas, el Océano Ártico, así como capas continentales de hielo de Norteamérica y Eurasia, además de la nieve estacional. Las variaciones temporales son sumamente complejas, debido a que extensas masas presentan cambios anuales muy importantes, siendo la capa de nieve la que tiene la mayor variabilidad anual (de hasta 80%), en contraste con las capas de hielo de la Antártida y Groenlandia, cuyas variaciones son a escalas de miles de años. La criósfera es vital dentro del sistema porque es muy efectiva reflejando la luz solar (albedo) y, por lo tanto, regresando buena parte de la radiación solar



La biósfera está constituida por todos los seres vivos.

al espacio, así reduce la entrada de energía calorífica al sistema climático. Además, es un buen aislante térmico que evita la pérdida de calor de continentes y mares que se encuentran debajo de las capas de hielo.

4. **Litósfera:** Es la capa sólida de la Tierra. Aunque juega un rol menor que la atmósfera o el océano, es extremadamente importante ya que cubre más de 30% de la superficie terrestre. A diferencia de los otros subsistemas éste presenta variaciones en escala de tiempo de millones de años. En la actualidad 70% del área continental se ubica en el Norte generando diferencias significativas entre el clima de los hemisferios sur y norte. La litósfera tiene una baja capacidad calorífica, es decir, que almacena poco calor y cambia rápidamente de temperatura, modificando la del aire cercano a la superficie. También transfiere masa y calor sensible a través de la evaporación de agua y, en menor medida, partículas sólidas. Su heterogeneidad —como la orientación y distribución de las montañas<sup>5</sup>—, y el tipo

<sup>5</sup> Que en el hemisferio norte presenta gran variación en la orientación Este-Oeste, especialmente en latitudes medias.

de suelo, afectan el balance de energía, evaporación, reflectividad de la superficie (albedo), entre otras.

5. **Biósfera:** Está constituida por todos los seres vivos del planeta, tanto plantas como animales. Es el subsistema más reciente y sensible al clima, además de fundamental en los ciclos del dióxido de carbono y nitrógeno, así como de aerosoles. En los últimos siglos, la humanidad ha tomado un papel preponderante por su habilidad (voluntaria o involuntaria) para actuar sobre algunas de las variables internas del sistema, principalmente en la composición química de la atmósfera y en la superficie terrestre, a través de la modificación del medio ambiente por las actividades agropecuarias, industriales y de construcción.

### VARIABILIDAD CLIMÁTICA

Los cambios en el sistema climático, a través del tiempo, pueden deberse a variaciones en su dinámica interna o a la presencia de forzamientos externos.

La dinámica interna es el resultado de los procesos de interacción entre los componentes del sistema climático, es decir, la atmósfera, la hidrósfera, la criósfera, etcétera. Los forzamientos externos, pueden ser de origen natural



El clima puede afectarse por contaminantes. Incendio en Arteaga. Abril 2012.

como variaciones en la actividad solar o volcánica; o de origen humano como el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero o cambios en el uso del suelo.

Cuando no existen forzamientos externos, los cambios del clima son influenciados por los procesos de la dinámica interna del sistema. De este modo, se tiene conocimiento de cambios del clima asociados a sistemas de interacción océano-atmósfera, como la variabilidad climática relacionada al fenómeno de *El Niño*-Oscilación del Sur (ENSO), o de las variaciones en periodos de décadas, como las asociadas a la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO por sus siglas en inglés) y a la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO por sus siglas en inglés). En forma adicional a las variaciones climáticas debidas a la dinámica interna, otros cambios del clima están asociados a forzamientos externos naturales como los observados en periodos largos de intensa actividad volcánica<sup>6</sup>.

<sup>6</sup> Vazquez, J., "Guía para el cálculo y uso de índices de cambio climático en México", Desarrollada en el marco del proyecto *Fortalecimiento de Capacidades en Detección de Cambio Climático en México*, México, Instituto Nacional de Ecología, 2010, pp. 13-14.

Existe una relación entre cambio climático y variabilidad climática. El primero se refiere a los cambios significativos de largo plazo en los patrones normales del clima por factores naturales y antropogénicos (actividad humana). Mientras que la variabilidad climática es el resultado de la interacción entre los componentes del sistema climático, excluyendo la influencia de la actividad humana.

La variabilidad climática es definida como las variaciones del estado promedio y otros datos estadísticos del clima en escalas temporales y espaciales más amplias que las de los fenómenos meteorológicos puntuales. La variabilidad puede deberse a procesos internos naturales del sistema climático, es decir, variabilidad interna, o a procesos influenciados por fuerzas externas naturales o antropogénicas, llamada variabilidad externa<sup>7</sup>.

A la variabilidad climática que se presenta en escalas de tiempo que comprenden periodos que duran años se le conoce como interanual, por ejemplo, cuando en algunos años se observan lluvias más intensas si se comparan con las que

<sup>7</sup> Baede, A., *Informe de Síntesis del Cuarto Informe*, op. cit., 2007.



La variabilidad climática se manifiesta con años más cálidos o más fríos. Cuatro Ciénegas.

se presentan comúnmente, o años más cálidos o fríos que otros; cuando se presenta variabilidad climática a escalas de tiempo menores, por ejemplo, dentro de la estación de lluvias, se le conoce como intraestacional. Por ejemplo, la variación estacional, a la que corresponde la fluctuación del clima a escala mensual y la determinación del ciclo anual de los elementos climáticos, está asociada a la secuencia de invierno, primavera, verano y otoño en latitudes medias; y a la alternancia de temporadas lluviosas y temporadas secas en latitudes tropicales, producto, principalmente, de la migración de la zona intertropical de convergencia (ZITC), que es una de las más importantes fluctuaciones climáticas asociadas a esta escala.

La variabilidad interanual acopla las variantes climatológicas que se presentan año con año, entre ellas se encuentra *El Niño*, fenómeno océano-atmosférico de escala planetaria,

que se desarrolla en el Océano Pacífico ecuatorial. Su aparición es tan irregular como sus consecuencias, pero definitivamente está ligado a la variabilidad del clima en el mediano plazo<sup>8</sup>. Los fenómenos asociados a las escalas temporales señaladas están caracterizados, a su vez, por fenómenos de tiempo atmosférico de diferentes dimensiones espaciales y grados de intensidad que impactan de forma significativa el desarrollo de las actividades del ser humano en diferentes lugares o regiones donde son característicos. Hacen parte de la fluctuación normal del clima y por si solos no constituyen, por muy extremos que sean, fundamento válido para hablar de cambio climático.

<sup>8</sup> Martínez, J., Fernández, B. A., *Cambio Climático. Una visión desde México*, Instituto Nacional de Ecología, 1ª ed., 2004, disponible en <<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/download/437.pdf>>, consultado el 17 de marzo de 2015.

Es importante mencionar que el clima depende, entre otros factores, del balance radiativo, es decir, del equilibrio que se encuentra al emitir tanta energía como la que se recibe. Este balance radiativo está controlado, a su vez, por factores forzantes y por la interacción entre los subsistemas constituyentes del sistema climático. Los factores forzantes son la energía electromagnética proveniente del Sol, que es la fuente de energía que acciona los procesos atmosféricos, y el efecto invernadero propiciado por la presencia de gases como el vapor de agua, el dióxido de carbono, el metano, el óxido nitroso, etcétera, en la atmósfera.

### TIPOS DE CLIMA EN EL MUNDO

La mayoría de los atlas tienen mapas de temperatura y precipitación en todo el mundo, y algunos otros de presión atmosférica, vientos dominantes, corrientes oceánicas y la cantidad de hielo marino durante el año. México, al igual que otros países, tiene clasificaciones más detalladas de sus condiciones climáticas, y este trabajo fue elaborado por Enriqueta García en 1998.

### LOS DETERMINANTES DEL CLIMA

En 1974, Mosiño señaló que los determinantes del clima son, según su orden de importancia: latitud, orografía, distribución de tierras y aguas, corrientes oceánicas y, en general, otros factores.

#### Latitud

Los rayos del Sol que impactan la Tierra inciden con mayor intensidad en la región tropical, oscilando alrededor de los trópicos de Cáncer  $23.5^\circ$  N y Capricornio  $23.5^\circ$  S, a diferencia del resto del planeta, donde los rayos llegan en un ángulo menor a la superficie, son menos intensos y se distribuyen sobre un área mayor.

Cuanto más cerca se está de la zona ecuatorial mayor es la disponibilidad de energía calorífica que va de esta zona a las polares. De modo que las mayores temperaturas se localizan en las regiones tropicales, manteniendo una distribución hacia los polos, donde disminuye gradualmente la temperatura promedio global.

La latitud forma parte primordial de la distribución de energía a escala planetaria, así que la temperatura de la Tierra es el resultado de un equilibrio de la energía que entra a la Tierra desde el Sol y la que sale de la Tierra hacia el



Las mayores temperaturas se localizan en las regiones tropicales.

espacio. La luz solar que llega al exterior del planeta es en promedio  $1.370$  watts por metro cuadrado ( $W/m^2$ ), esta cantidad es pesada por el área total de la tierra dando aproximadamente  $341 W/m^2$ , conocida como la radiación Solar entrante, alrededor de 30% de la radiación solar que llega a la atmósfera de la Tierra es absorbida en la superficie, el resto es absorbido por la atmósfera o reflejado de vuelta al espacio por las nubes, pequeñas partículas en la atmósfera, nieve, hielo y desiertos en la superficie del planeta.

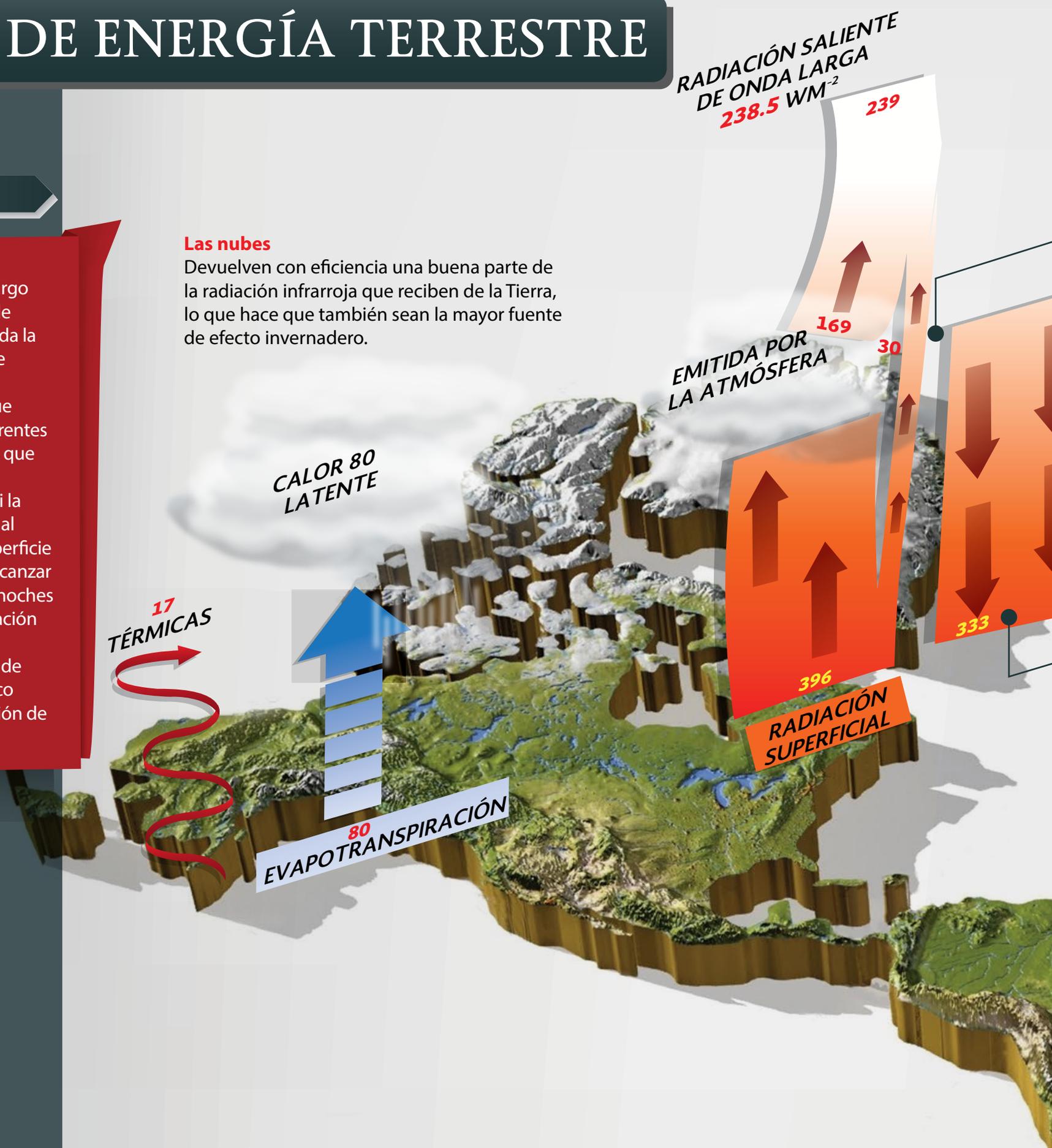
# FLUJOS DE ENERGÍA TERRESTRE

## EL EQUILIBRIO

La Tierra, para mantenerse térmicamente estable a lo largo del tiempo debe ser capaz de emitir, en término medio, toda la energía recibida en forma de radiación. Existen unos mecanismos reguladores que efectúan dicha tarea de diferentes maneras. De la energía solar que llega a la Tierra, en forma de radiación de onda corta, casi la mitad es reflejada de nuevo al espacio por las nubes, la superficie y el aire. El calor que logra alcanzar la Tierra es devuelto por las noches al espacio, en forma de radiación de onda larga. Sin embargo, ciertos gases como el vapor de agua y el anhídrido carbónico reflejan parte de esta radiación de nuevo a la superficie.

### Las nubes

Devuelven con eficiencia una buena parte de la radiación infrarroja que reciben de la Tierra, lo que hace que también sean la mayor fuente de efecto invernadero.





## LA ATMÓSFERA

La atmósfera se calienta desde abajo de acuerdo con la característica diatérmica del aire, y no desde arriba como a primera vista podría pensarse; esto explica que se produzca un descenso de temperatura en la tropósfera a medida que aumenta la altitud. La atmósfera irradia también calor hacia arriba del mismo modo que lo hace la Tierra, que se pierde en el espacio, y hacia abajo, siendo reabsorbido por ésta. Tales intercambios suponen la devolución al espacio de una cantidad de calor igual a la que efectivamente se recibe, hecho que permite mantener el equilibrio térmico del planeta.

### Las nubes

Y los gases atmosféricos (dispersión atmosférica) reflejan hacia el espacio el **22.5%** de la radiación solar incidente.

Parte de la energía absorbida en la superficie de la Tierra se irradia de nuevo o es remitido a la atmósfera y al espacio en forma de energía térmica. La temperatura que sentimos es una medida de esta energía de calor. En la atmósfera, no toda la radiación emitida por el planeta alcanza a salir al espacio exterior, parte de ella se refleja de nuevo a la superficie por la atmósfera (efecto invernadero natural) que conduce a un promedio mundial de alrededor de  $14^{\circ}\text{C}$ , muy por encima de  $-19^{\circ}\text{C}$  que se esperaba obtener si toda la radiación de onda larga fuera dirigida hacia el espacio.

### Orografía

Es el conjunto de elevaciones y montañas existentes en una zona, región o país. La temperatura superficial del aire tiende a enfriar gradualmente con el aumento de altitud. Las temperaturas en el fondo de los valles son generalmente más cálidas que las temperaturas en las laderas y cimas. Al observar las montañas desde la distancia, podemos determinar la elevación que aproximadamente representa una



En condiciones promedio la temperatura del aire disminuye con la altura.

temperatura superficial de  $0^{\circ}\text{C}$  por la búsqueda de la línea de nieve. Por encima de esta temperatura límite es lo suficientemente fría para mantener la nieve y el hielo en un estado congelado. Por debajo de la línea de nieve temperaturas medias están por encima de la congelación.

Muchas veces las montañas dan lugar a diferentes climas, ya que cuando el aire húmedo es forzado a elevarse para cruzarlas, forma densas nubes que producirán precipitaciones y temperaturas menores a las que se presentaron cuando el aire empezó a ascender sobre la ladera de barlovento. Mientras el aire desciende y va perdiendo su humedad, se posa sobre la ladera de sotavento aumentando su temperatura, con un clima más cálido y seco (efecto Foehn).

En promedio, cuando el aire es húmedo, la razón de cambio de temperatura conforme aumenta la altura es de  $-5^{\circ}\text{C}$  por cada 1,000 m de ascenso, en cambio cuando el aire es seco, la razón de cambio de temperatura conforme aumenta la altura es de  $-10^{\circ}\text{C}$  en promedio. Por lo anterior existen lugares en el mundo donde encontramos gran variedad de climas en unos cuantos kilómetros de distancia.

### Distribución de tierras y aguas

Los océanos son un componente fundamental del sistema climático, cerca de 71% de la superficie terrestre está cubierta por agua. Los procesos atmosféricos se realizan rápidamente, en cambio las mezclas en el océano son más lentas. La interacción de ambos son las responsables de las variaciones climáticas.

La alta capacidad calorífica de los océanos amortigua los cambios de temperatura que se darían cada día, cada temporada y cada año tanto en zonas costeras como en tierra adentro. Los océanos disponen de una gran cantidad de energía almacenada, debido a que el agua mantiene el calor por más tiempo que la atmósfera y así las ciudades que están cerca de grandes cuerpos de agua tienen climas más cálidos, a diferencia de las regiones continentales alejadas de éstos. Los cuerpos de agua hace que las temperaturas extremas sean menos probables, porque se calienta y enfría muy lentamente, mientras que, en los lugares donde no hay mucha agua, la tierra se calienta y enfría rápidamente.

Los cuerpos de agua profundos, como los océanos, contienen energía térmica almacenada por la absorción de radiación solar de miles de años. Este calor se encuentra disponible para transferir por conducción y convección a la

atmósfera. La cantidad de calor transferido desde la superficie del océano a la atmósfera inferior está fuertemente controlada por el calor almacenado en los océanos, cabe mencionar que, las variaciones anuales en la disponibilidad de la radiación solar tienen un efecto mínimo en la cantidad de este flujo de calor. En consecuencia, la cantidad de energía que fluye a la atmósfera es relativamente alta, incluso cuando la entrada de la insolación es baja.

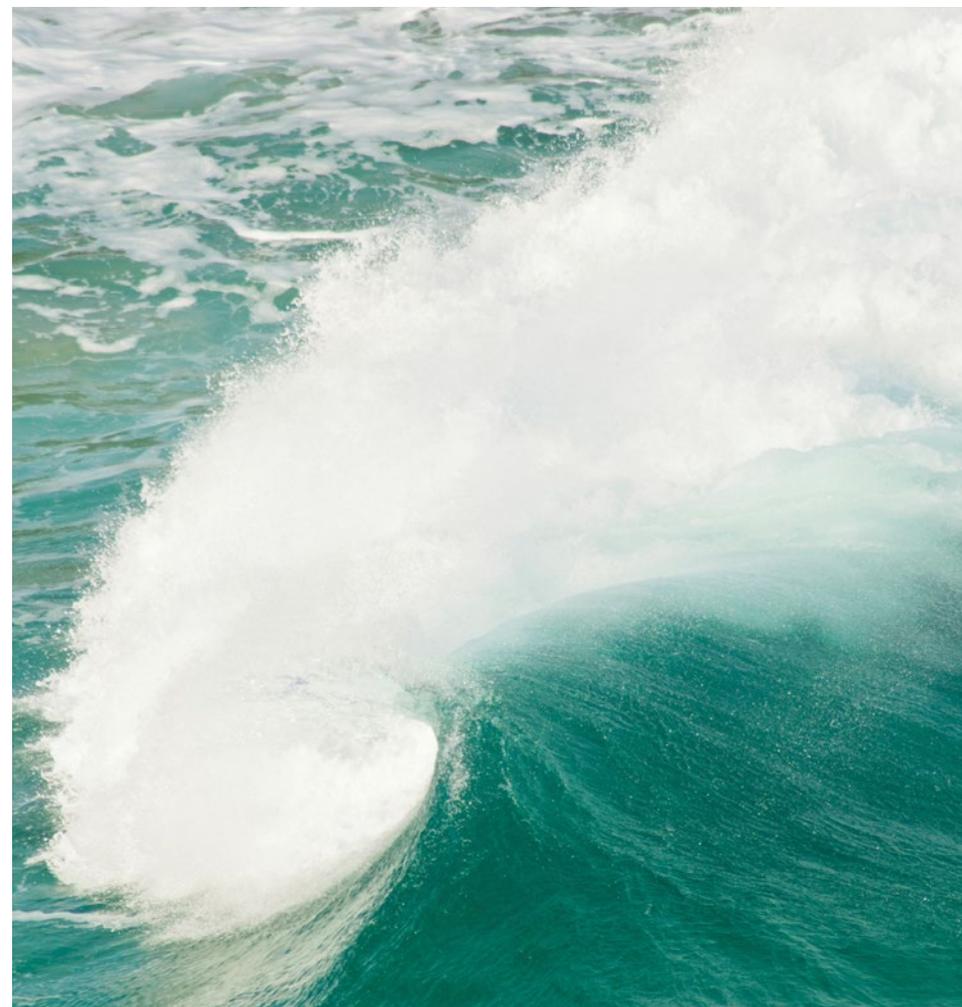
Como es de esperarse, la distribución entre los continentes y mares influye en las variaciones de temperatura y humedad del aire a escala global, creando distintos tipos de masas de aire que mantienen sus características físicas, que transportan energía por medio de la conducción y convección a la atmósfera. Las masas de aire forman parte del balance de energía.

Las masas de aire se clasifican de acuerdo con Willett<sup>9</sup>, con características de humedad marítima o continental identificadas con las letras “m” y “c”, respectivamente, y con sus características de temperatura en: ecuatorial, tropical, polar y ártica o antártica nombradas con las letras “e”, “t”, “p” y “a”.

### Las corrientes oceánicas

Las aguas del océano están en constante movimiento, ya sea horizontal o verticalmente. Los desplazamientos horizontales producen flujos superficiales y subsuperficiales conocidos como corrientes oceánicas y son impulsadas por los vientos asociados a la gran escala de la circulación global de la atmósfera. El arrastre por fricción causado por el viento que sopla sobre la superficie del océano es el factor principal que determina el curso que estas corrientes tomarán. La presencia de masas de tierra también influyen en la dirección de las corrientes oceánicas. Estas barreras pueden redirigir el flujo de Este-Oeste, provocando que fluyan en una dirección Norte o Sur.

Las circulaciones oceánicas transportan aproximadamente la misma cantidad de energía hacia los polos, como la atmósfera. La forma básica en ambos hemisferios es un ciclo, con corrientes dirigidas hacia los polos impulsada por el viento hacia el Oeste de flujo en bajas latitudes cercanas al Ecuador y a lo largo de las márgenes occidentales.



Las aguas del océano están en constante movimiento.

Más allá de aproximadamente 35°N y 35°S las principales corrientes circulan hacia el Este, transportando agua cálida hacia latitudes más altas. Este patrón se ve claramente en el Atlántico Norte y en el Pacífico Norte, con las corrientes del Golfo y de Kuroshio, respectivamente. Para equilibrar el flujo hacia los polos existen corrientes de agua fría que se mueven hacia el Ecuador en los lados orientales a las cuencas oceánicas. En el hemisferio sur, debido a la ausencia casi total de tierra entre 35°S y 60°S, los giros oceánicos están vinculados con una fuerte corriente circumpolar alrededor de la Antártida.

Las corrientes oceánicas superficiales pueden influir en el clima de las regiones debido a que el agua del océano puede tener una temperatura de contraste. En general, las corrientes que fluyen desde los trópicos a latitudes más altas tienen flujos relativamente cálidos. Los flujos de agua fría del océano se producen cuando las corrientes se mueven desde altas latitudes a los trópicos. Las corrientes oceánicas cálidas

<sup>9</sup> H. C. Willett (June 1933). "American Air Mass Properties". *Papers in Physical Oceanography and Meteorology* (Massachusetts Institute of Technology) 2 (2). Retrieved 2009-10-28.

das causan efectos moderadores en las temperaturas de la tierra. Como la corriente del Golfo que calienta las temperaturas a lo largo de la costa este de Estados Unidos desde Florida hasta Carolina del Norte. Además, una extensión de este flujo, conocida como la corriente del Atlántico Norte, viaja a través del océano dando lugar a un aumento de las temperaturas del aire en Gran Bretaña y Europa occidental. Las corrientes frías superficiales del océano se originan en latitudes polares y generalmente fluyen hacia el Ecuador, al igual que las corrientes cálidas superficiales, que son impulsadas en gran medida por la circulación atmosférica. Los efectos climáticos de las corrientes frías son más evidentes en verano; por ejemplo, la corriente fría de California frente a la costa oeste de Estados Unidos que modera la temperatura desde Washington hasta California.

En conclusión, las corrientes oceánicas funcionan como transportes de energía (calor) y como amortiguadores de la temperatura de las regiones costeras principalmente y en algunos casos hasta tierra adentro de los continentes.

### Otros factores que determinan el clima

Existen otros patrones atmosféricos que son determinantes del clima en una región y, que no necesariamente son fenómenos de corta duración como las tormentas:

**Zona Inter-Tropical de Convergencia.** Se encuentra en las regiones tropicales. Es un área de intensa actividad convectiva y aire ascendente, que se encuentra permanente en las regiones ecuatoriales. Es el resultado de la interacción de los vientos alisios del hemisferio norte y sur. En esta zona, el aire caliente se eleva liberando su energía a la atmósfera y formando nubes de amplio desarrollo vertical, que producirán precipitaciones intensas. Cuando el aire ascendente alcanza entre 12 y 15 km, la humedad ha disminuido en su mayoría y se presenta un desplazamiento latitudinal en altura, que transporta hacia las regiones subtropicales aire seco y caliente, que concuerda con las regiones de los desiertos. Este patrón básico de circulación es conocido como célula de Hadley, por el trabajo que realizó este investigador en 1735.

### Sistemas de presión atmosférica semipermanentes.

Son sistemas de baja y alta presión que persisten sobre una determinada área durante la mayor parte del año. Éstos generan patrones de circulación que predominan alrededor de la región de incidencia, además interactúan con las corrientes oceánicas impulsando principalmente las corrientes superficiales y determinando el clima de algunas regiones. Los patrones de los sistemas de presión semipermanentes presentan variaciones alrededor del año donde se contraen



Las corrientes frías se originan en latitudes polares.

o expanden los centros de baja y alta presión, modificando principalmente las características de las masas de aire, los vientos, la temperatura y la humedad. Por lo que éstos son una consecuencia directa del balance y distribución de energía de continentes y océanos.

**Brisas marinas y terrestres.** Son otro elemento del clima en las regiones que tienen un cuerpo de agua cercano. La mayoría tiene su origen térmico en la frontera entre el continente y los cuerpos de agua en el mundo, pero los patrones varían de manera particular en cada región, afectando principalmente la convección, los vientos costeros y la formación de nieblas sobre la costa. Tienen como característica el desplazamiento del aire del cuerpo de agua a la costa, debido a que se calienta más rápidamente la tierra durante el día. Además, durante la noche se genera el patrón invertido debido al rápido enfriamiento de la superficie generando una circulación desde la tierra al cuerpo de agua. Este mecanismo es muy importante en las regiones costeras, lagos y ríos, en general, ya que determinan el clima de la región, en ausencia de condiciones meteorológicas predominantes.

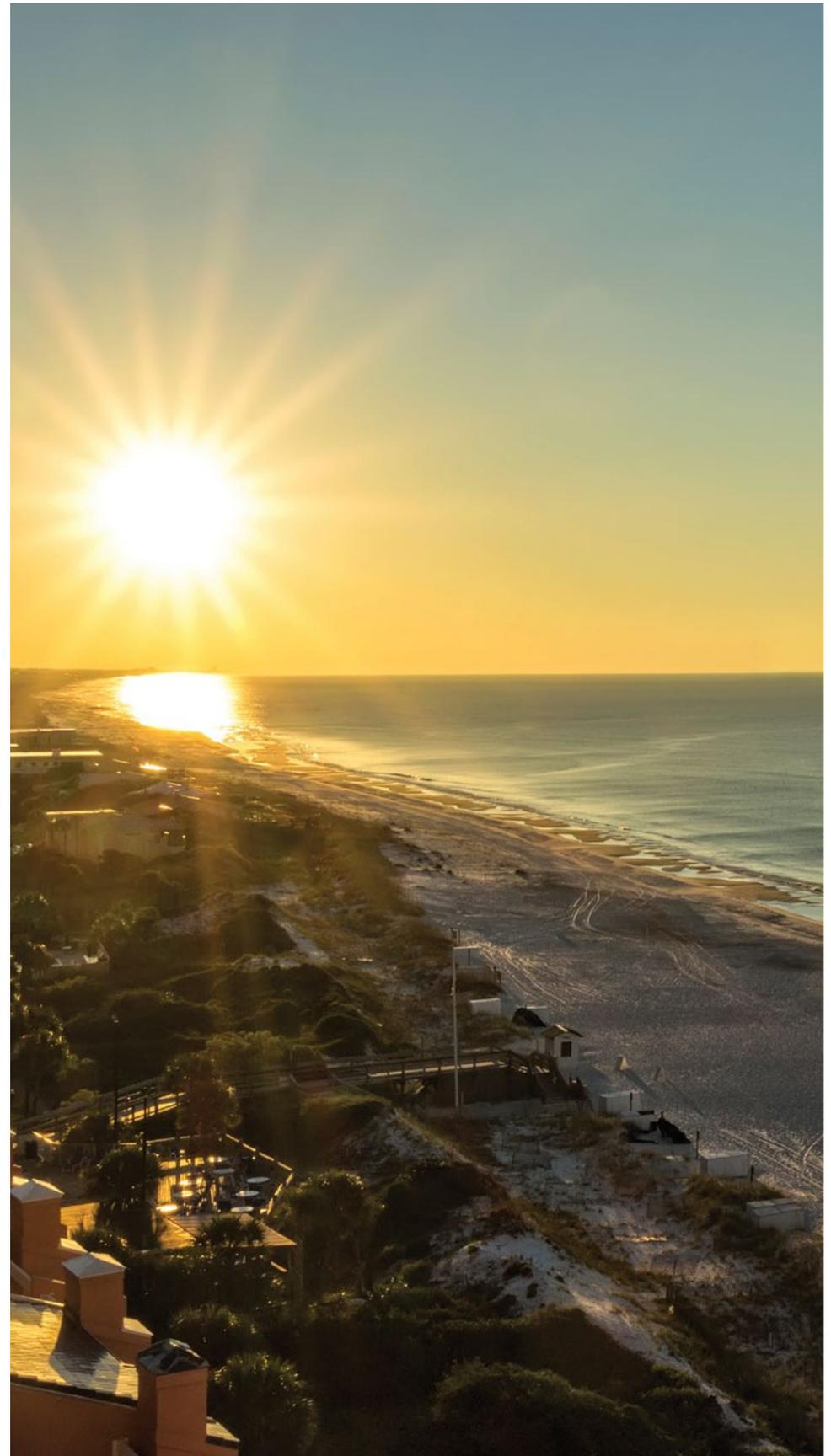
Como se ha mostrado, los mecanismos que determinan el clima de una región son el resultado de varios factores como el balance energético, los estratos altitudinales, la distribución de continentes y océanos, corrientes marinas y otros.

Varios intentos por clasificar el clima de una región resultan en considerar algunas variables climatológicas como la cantidad de precipitación anual y la temperatura media anual de la región, es decir, como una consideración numérica que desencadena en las características de la vegetación predominante de la región.

### CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA

La clasificación del clima de Köppen es uno de los sistemas más utilizados. Fue publicado por primera vez en Rusia por el climatólogo alemán Wladimir Köppen en 1884. Tuvo varias modificaciones posteriores por él mismo, de las que se destacan las de 1918 y 1936, y más tarde la realizada en colaboración con el climatólogo alemán Rudolf Geiger.

De acuerdo con este sistema climático, la vegetación nativa es la mejor expresión del clima. Por lo tanto, la distribución de los límites de la zona climática combina un registro de temperaturas y precipitaciones mensuales,



Ejemplo de región costera que es influenciado por brisas marinas y terrestres.

Clasificación Climática de Köppen

Temperatura				Humedad				
Clima	Descripción	T	F	W	f	m	w	s
A	Tropical				Selva (Af)	Monzónico (Am)	Sabana (Aw)	
B	Árido		Estepa (BS)	Desierto (BW)				
C	Templado				Húmedo (Cf)		Invierno Húmedo (Cw)	Verano Seco (Cs)
D	Templado frío				Húmedo (Df)		Invierno Húmedo (Dw)	Verano Seco (Ds)
E	Frío	Tundra	Polar					

**Grupo A. Climas húmedos tropicales**, donde la temperatura media del mes más frío es por encima de 18°C, con los siguientes subgrupos:  
 Af: Selva húmeda tropical.  
 Am: Monzónico tropical.  
 Aw: Sabana tropical

**Grupo B. Climas secos**, donde la temperatura media del mes más frío es por encima de 18°C y con déficit de precipitación:  
 BW: Desierto  
 BS: Estepa

**Grupo C. Clima templado húmedo**, donde la temperatura media del mes más frío está entre 18 y 0°C y además la temperatura del mes más cálido es mayor a 10°C.  
 Cf: Templado húmedo  
 Cw: Templado húmedo con invierno seco  
 Cs: Templado húmedo con verano seco

**Grupo D. Clima templado húmedo frío**, donde la temperatura promedio del mes más cálido es mayor a 10°C y la temperatura promedio del mes más frío es menor o igual que 0°C.  
 Df: Templado húmedo frío  
 Dw: Templado húmedo frío con invierno seco  
 Ds: Templado húmedo frío con verano seco

**Grupo E. Clima frío**, donde la temperatura promedio anual del mes más cálido es menor a 10°C.  
 ET: Tundra  
 EF: Polar

además de incorporar la estacionalidad de la precipitación. Sobre las últimas revisiones de la clasificación climática se encuentra la actualización por Peel en 2007<sup>10</sup>, que es la aplicación de la metodología de Köppen–Geiger a partir de datos en malla de temperatura y precipitación de la

Unidad de Investigación del Clima (por sus siglas en inglés, CRU) y del Centro Global en Precipitación Climatológica (por sus siglas en inglés GPCC).

El sistema de clasificación se ha definido en grupos que involucran principalmente la variable de temperatura, y después se subdivide de acuerdo a la frecuencia de precipitación durante el año.

<sup>10</sup> Peel, M. C., Finlayson, B. L. y McMahon, T. A., *Updated world map of the Köppen–Geiger climate Classification*, UE, 2007, Hydrology and Earth System Sciences, Vol 11, pp. 1633–1644.

La clasificación de Köppen-Geiger es con la que más se ha trabajado, pero se tienen otras metodologías como el sistema de Thornwaite, que se basa en la variable de evapotranspiración potencial para generar algo más adecuado a la vegetación de cada región.

En el caso de México, la geógrafa Enriqueta García, en 1988, realizó una adaptación del sistema de Köppen para agrupar en otros subgrupos los climas de México, el cual fue publicado por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).

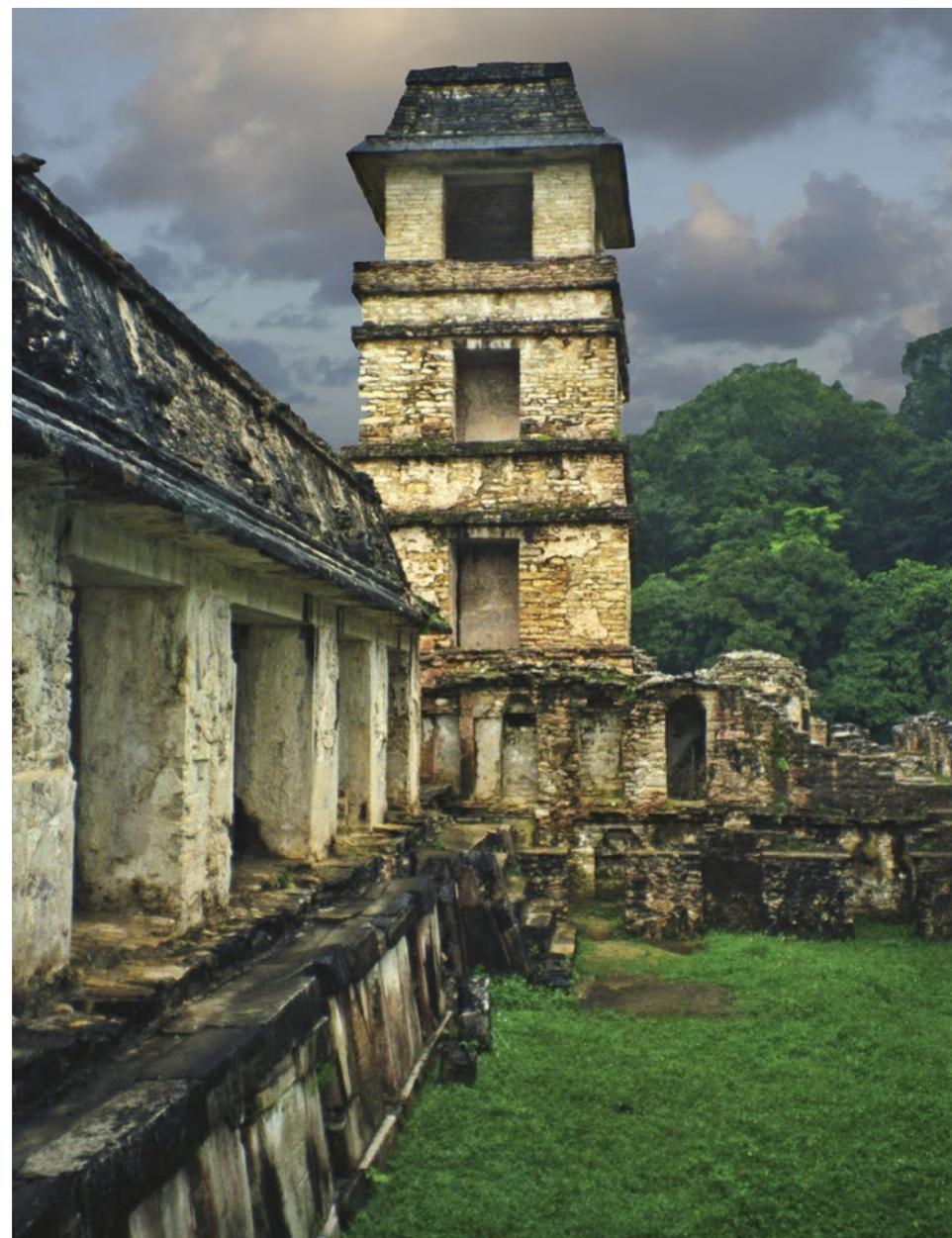
### EL CLIMA EN LA REPÚBLICA MEXICANA

El clima en Centroamérica es muy diverso, debido a diferentes factores como su posición geográfica, configuración del relieve continental y la presencia de océanos y corrientes adyacentes a su territorio<sup>11</sup>, y aunque México se encuentra en Norteamérica comparte estas características.

El clima se puede clasificar de una manera muy general de acuerdo a la posición geográfica. Por ejemplo, el norte de México se encuentra localizado a 29.30°N del Trópico de Cáncer y ahí se presentan veranos cálidos e inviernos fríos; mientras que las regiones centro y sur del país se encuentran al sur del trópico; ahí las diferencias de temperatura entre las estaciones de verano e invierno son mínimas, excluyendo los eventos extremos. Y esta diferencia disminuye más cerca de latitudes ecuatoriales<sup>12</sup>.

De acuerdo a la clasificación climática de Köppen<sup>13</sup>, en México se puede encontrar una gran diversidad de climas: desde bosques tropicales (Af, por sus siglas en inglés) en los estados del sur y la península de Yucatán, hasta condiciones climáticas áridas o desérticas (BW, por sus siglas en inglés) y semiáridas o de estepa (BS, por sus siglas en inglés) en el noroeste; mientras que en la parte central del país, a lo largo de la Sierra Madre Occidental, Sierra Madre Oriental y el Eje Volcánico Transversal se puede encontrar el clima de tierras altas, caracterizado por cambios drásticos en zonas de gran relieve vertical<sup>14</sup>.

El tipo de clima está estrechamente relacionado con el tipo de vegetación, aunque en México se pueden encontrar



En México se puede encontrar gran diversidad de climas.

diversos tipos de vegetación en un mismo tipo de clima, o un mismo tipo de vegetación en diversos climas<sup>15</sup>. El clima en nuestro país es modulado condiciones atmosféricas presentes en los trópicos, por ejemplo la posición e intensidad de los sistemas semipermanentes de alta presión del Atlántico y el Pacífico subtropical, la Zona de Convergencia Intertropical, y la circulación de los vientos alisios<sup>16</sup>.

11 Vivó Escoto, Jorge, *The Handbook of Middle American Indians*, EUA, University of Texas Press, 1964.

12 Vivó Escoto, Jorge, *The Handbook of Middle American Indians*, op. cit., 1964.

13 Köppen, W., Geiger, R. *Klimate der Erde*, Gotha: Verlag Justus Perthes. Wall-map 150 cm x 200 cm, 1928.

14 Ahrens, C. D., *Essentials of Meteorology: An Invitation to the Atmosphere*, 7ª ed., Belmont, CA, 2012, Brooks/Cole, pp. 506.

15 Miranda, F., E. Hernández X., *Los tipos de vegetación de México y su clasificación*. México, 1963, Sociedad Botánica de México, pp. 29-179.

16 Mendoza, B., Jáuregui, E., Díaz-Sandoval, R., *Historical droughts in central Mexico and their relation with El Niño*, *Journal of Applied Meteorology* 44, 2005, pp. 709-716.



En México pueden encontrarse climas muy fríos en zonas de montaña.

A su vez, fenómenos atmosféricos de gran escala como la ocurrencia del Monzón de Norteamérica<sup>17</sup>, ondas y ciclones tropicales<sup>18</sup> y la Oscilación Decadal del Pacífico<sup>19</sup> afectan el clima de regiones localizadas en el norte, noroeste y parte central de México.

En los meses de verano es característica la presencia del fenómeno de sequía, también conocido como sequía de veranillo o *mid-summer drought* en la parte sur de México y la región de Centroamérica, que a su vez está asociada al desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical, la intensificación de los vientos alisios y una disminución en el flujo de humedad en niveles bajos<sup>20</sup>. En invierno, el clima se ve influenciado por fenómenos característicos de la es-

tación, como el paso de sistemas frontales y tormentas<sup>21</sup> invernales<sup>22</sup>.

*El Niño* – Oscilación del Sur afecta en gran medida los patrones de precipitación en México<sup>23</sup>, favoreciendo lluvias invernales por arriba del promedio en el noroeste y lluvias por debajo de promedio en el Istmo de Tehuantepec. En el verano, asociado a la variabilidad del ENOS, se presenta un desplazamiento hacia el sur de la Zona de Convergencia Intertropical, vientos alisios muy intensos y menor humedad relativa<sup>24</sup>.

El clima en México es muy variado, encontrándose climas muy fríos en zonas de montaña y muy calurosos cerca de la costa. En algunos estados, por ejemplo, debido al gran relieve vertical que presentan y su cercanía a algún océano, se pueden presentar temperaturas máximas cercanas a los

17 Turrent, C., Cavazos T., *Role of the land-sea thermal contrast in the interannual modulation of the North American Monsoon*, Geophys, 2009, Res. Lett., 36, L02808, doi:10.1029/2008GL036299.

18 García-Oliva, F., Ezcurra E., Galicia, L., *Pattern of rainfall distribution in the Central Pacific coast of Mexico*, Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography, vol. 73, No. 3/4, 1991, Wiley.

19 Mendez M., Magaña V., *Regional Aspects of Prolonged Meteorological Droughts over Mexico and Central America*, Journal of climate, vol. 23, 2010, pp. 1175 – 1188.

20 Mendez M., Magaña V., *Regional Aspects of Prolonged Meteorological Droughts over Mexico and Central America*, op. cit., 2010.

21 Jáuregui E., Luyando E., Casasola M., *13th Symposium on Global Change and Climate Variations. Variability of severe winters in the Mexico basin during the XXth century*, Ciudad de México, 2002, Universidad Nacional Autónoma de México.

22 En las temporadas invernales de 1957 a 1960 se presentaron valores de temperatura muy por debajo de lo normal.

23 Mendez M., Magaña V., *Regional Aspects of Prolonged Meteorological Droughts over Mexico and Central America*, op. cit., 2010.

24 Mendez M., Magaña V., *Regional Aspects of Prolonged Meteorological Droughts over Mexico and Central America*, op. cit., 2010.

40°C durante el día y temperaturas cercanas o por debajo de los 0°C en la noche.

Esta diversidad de climas es la que favorece la presencia de una gran cantidad de especies de flora y fauna a lo largo del territorio nacional, convirtiendo a México en uno de los 12 países megadiversos de acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas<sup>25</sup>.

## DATOS CLIMÁTICOS DISPONIBLES EN MÉXICO

### Banco Nacional de Datos Climatológicos

Hacia finales del siglo XIX, en la República Mexicana se inició el registro sistemático de información climatológica con la instalación del Observatorio Meteorológico en la Ciudad de México. Se ubicó en la azotea del Palacio Nacional (19° 25' 59" latitud Norte y 99° 07' 58" longitud Oeste y 2,233 msnm), e inició operaciones el 6 de marzo de 1877. En 1919 fue trasladado al edificio del exArzobispado, en Tacubaya (19° 24' 13" latitud norte, 99° 11' 46" longitud oeste y 2,308 msnm), donde hoy todavía continúa sus funciones.

Por decreto, en 1901, adquiere el nombre de Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y se convierte en la instancia más importante de generación y difusión de información meteorológica y climatológica del país.

Posteriormente, y debido a necesidades propias de información, otras dependencias del sector público y privado instalan sus redes climatológicas, alcanzando un total de 5,145 estaciones climatológicas.

#### Red Climática Nacional

Dependencias	Número de estaciones
Servicio Meteorológico Nacional	837
ExSecretaría de Recursos Hidráulicos	3,490
Comisión Federal de Electricidad	335
Servicios a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano	66
Confederación de Agricultores de Sinaloa	17
Ferrocarriles Nacionales de México	72
Otras dependencias	328
<b>TOTAL</b>	<b>5,145</b>

<sup>25</sup> Biodiversidad de México, SEMARNAT, disponible en <<http://cruzadabosques-agua.semarnat.gob.mx/iii.html>>, consultado el 7 de octubre de 2007.



Observatorio Meteorológico de la Ciudad de México.





El SMN cuenta con el archivo climatológico más importante del país.

El 16 de enero de 1989, con la creación de la Comisión Nacional del Agua (ahora CONAGUA), el SMN se incorpora a ésta, teniendo como atribuciones “administrar el archivo histórico y el banco de datos en materia de meteorología y climatología”, así como ser la dependencia del Gobierno Federal encargada “de proporcionar el servicio público de consulta de información meteorológica y climatológica a todo usuario que lo requiera del sector público y privado<sup>26</sup>”.

Para darle cumplimiento, en los observatorios se realiza una observación cada hora, y se asienta actualmente en la forma denominada SMN/82 SI/00, además en las estaciones climatológicas se realiza una observación cada 24 horas (08:00 horas), la cual se asienta en la forma denominada 212-50.

Ambas se concentran periódicamente en el Servicio Meteorológico Nacional y forman parte del Banco Nacional de Datos Climatológicos, para la elaboración de los múltiples estudios y análisis de tipo climatológico que se realizan en nuestro país.

El SMN cuenta con el archivo climatológico más importante del país, con datos históricos desde fines del siglo XIX hasta la fecha.

Los datos recopilados se someten a un proceso de validación y se obtienen estadísticas básicas como valores medios, máximos y mínimos. Para el manejo del archivo, el Servicio Meteorológico Nacional emplea el sistema de cómputo CLICOM, desarrollado por la Organización Meteorológica Mundial para estandarizar el manejo de datos climatológicos y permitir un intercambio de información nacional e internacional ágil y eficiente.

Actualmente el Banco Nacional de Datos Climatológicos cuenta con un área de 420 m<sup>2</sup>, y está compuesto por tres salones de 20 × 7.0 m, con una altura de 4 m, y se ubica dentro de las instalaciones del SMN.

### Base de Datos Climatológicos

La Base de Datos Climatológica del Servicio Meteorológico Nacional contiene la información histórica del clima a nivel nacional. Está conformada por 33 Tablas (una para cada Entidad Federativa y una a nivel nacional) en formato ASCII con la intención de que éstas puedan ser exportables a cualquier manejador de bases de datos y por lo tanto ser consultadas mediante paquetería de cómputo accesible a todo usuario, como Excel o Notepad.

<sup>26</sup> Reglamento Interior de CONAGUA publicado en el *Diario Oficial de la Federación* el 12 de octubre de 2012, Artículo 58, Fracción IX.

## Conformación de la Base de Datos al 31 de diciembre de 2014

Estado	Estaciones operativas	Año final disponible	Registros disponibles
Aguascalientes	55	2014	300.236
Baja California	81	2010	378.196
Baja California Sur	120	2012	556.089
Campeche	46	2013	240.656
Chiapas	140	2014	856.825
Chihuahua	45	2012	605.189
Coahuila	90	2013	458.558
Colima	37	2014	172.492
Ciudad de México y Valle de México	155	2013	666.904
Durango	81	2008	457.860
Guanajuato	112	2012	641.937
Guerrero	137	2014	753.901
Hidalgo	40	2013	332.143
Jalisco	122	2013	948.341
México	128	2012	553.461
Michoacán	111	2012	756.952
Morelos	50	2013	259.460
Nayarit	40	2009	202.227
Nuevo León	106	2011	436.288
Oaxaca	55	2014	530.782
Puebla	88	2013	568.482
Querétaro	40	2011	157.201
Quintana Roo	34	2012	154.636
San Luis Potosí	157	2011	596.014
Sinaloa	66	2013	373.447
Sonora	149	2014	705.903
Tabasco	53	2013	173.977
Tamaulipas	179	2013	687.456
Tlaxcala	24	2013	120.518
Veracruz	105	2012	827.343
Yucatán	60	2007	244.701
Zacatecas	118	2012	471.915

### El sistema CLICOM

En 1987 la Organización Meteorológica Mundial presentó el sistema CLICOM a los países miembros, como una alternativa para generar y obtener información climatológica digital. Desde entonces el SMN lo utiliza para uso de sus investigadores y diversos usuarios externos.

Las estadísticas generadas por el CLICOM corresponden a:

1. Series mensuales
2. Series de diez días
3. Promedios y valores extremos en periodo diarios, a diez días y mensuales

### Sistema MCH-MX

Pese a la efectividad inicial del CLICOM, hoy en día los nuevos retos tecnológicos y de información demandan su sustitución, de ahí que desde 2011, México comenzará a realizar pruebas con el sistema MCH-MX, luego de que personal del Servicio Meteorológico Nacional conociera en Montevideo, Uruguay, el sistema Meteorología, Climatología e Hidrología (MCH), un programa elaborado por consultores mexicanos de la OMM, que busca lograr esta transición informática.

Para que el MCH pudiese adecuarse a las necesidades específicas del Servicio Meteorológico Nacional, fue nece-

sario adaptarlo a las necesidades de México, dando como resultado el sistema MCH-MX, el cual al día de hoy se está probando en forma piloto.

Las estadísticas generadas por el MCH-MX corresponden a:

1. Series mensuales
2. Series a diez días
3. Series semanales
4. Series anuales
5. Normales climatológicas

### RED DE ESTACIONES DE LA CONAGUA QUE PROPORCIONAN INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA

#### Red Nacional de Estaciones Climatológicas Convencionales

Actualmente operan poco más de 3,000 estaciones, de las cuales 98% están bajo jurisdicción directa de CONAGUA, mientras que 2% restante son propiedad de diversas instituciones, principalmente la CFE, Ferrocarriles Nacionales, gobiernos estatales y universidades públicas.

Las estaciones climatológicas de CONAGUA son administradas por la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos, y son operadas regionalmente a través de los Organismos de Cuenca de la CONAGUA, es decir, que el Servicio Meteorológico Nacional no es propietario de la información sino que dispone de la información en calidad de usuario, sin embargo, bajo este esquema es capaz de generar la base de datos climatológica nacional, la cual utiliza para la elaboración de diversos productos climáticos.

#### Red Sinóptica de Superficie

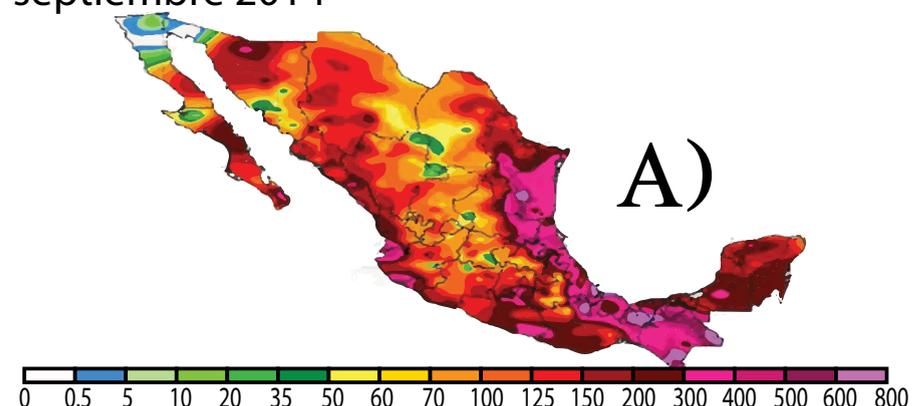
Consta de 79 Observatorios Meteorológicos ubicados en ciudades de la República Mexicana que representan importancia para la población en general, principalmente en capitales de los estados y localidades costeras.

Esta red es administrada y operada por la Subgerencia de Redes de Observación de la Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional. Mediante los sistemas de telecomunicaciones, la información llega directamente a los sistemas de cómputo del SMN y tras una adecuada decodificación, queda inmediatamente disponible tanto para los usuarios internos como externos.

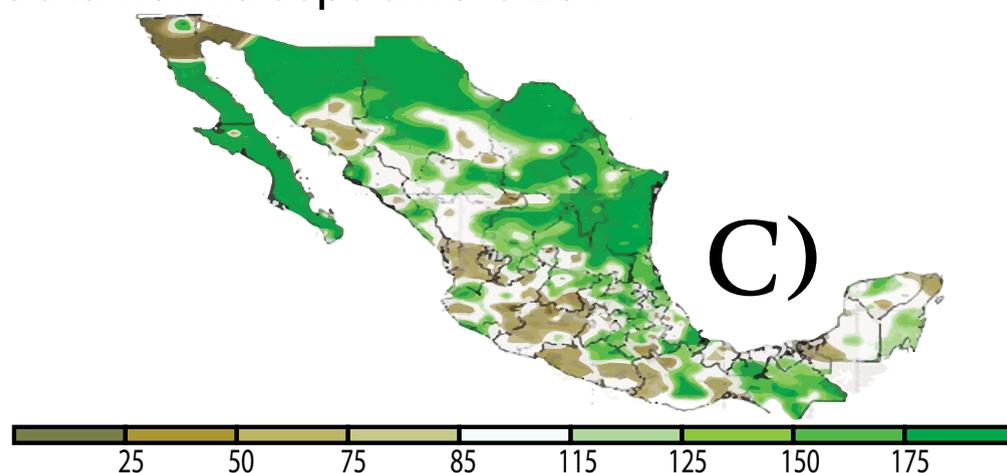
## CLIMATOLOGÍA DE LLUVIAS BASE 1971-2000

Obtenido de la Base de Datos CLICOM del Servicio Meteorológico Nacional

### Precipitación acumulada mensual (mm) septiembre 2014



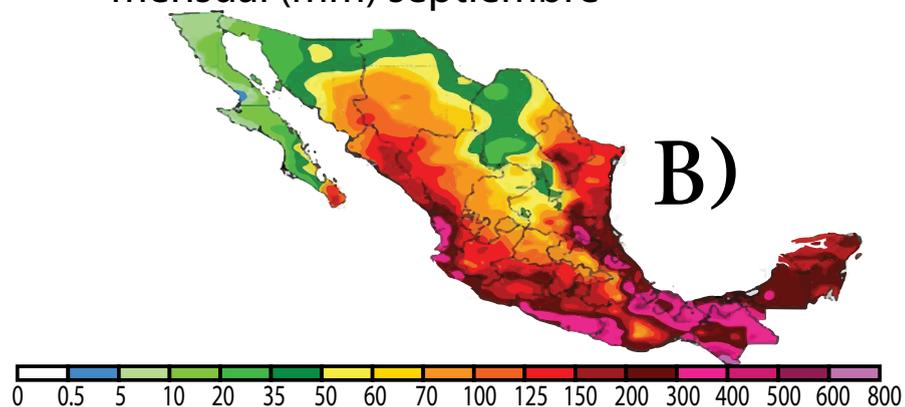
### Anomalía mensual en por ciento de la norma septiembre 2014



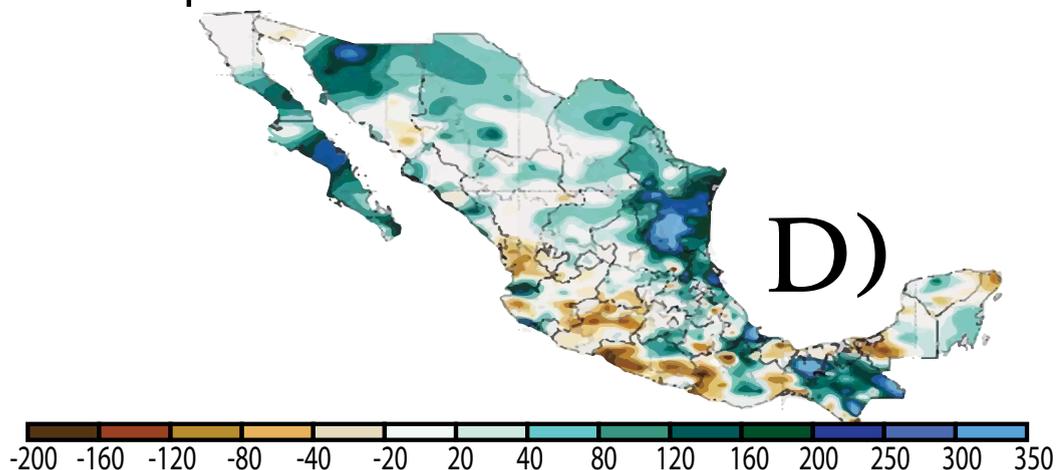
## CLIMATOLOGÍA DE LLUVIAS BASE 1971-2000

Obtenido de la Base de Datos CLICOM del Servicio Meteorológico Nacional

### Climatología precipitación acumulada mensual (mm) septiembre



### Anomalía mensual (mm) septiembre 2014



### Productos climáticos disponibles para los usuarios

1. CD interactivo con valores Medios y Extremos
2. Normales climatológicas, periodos 1951-2010, 1961-1990, 1971-2000 y 1981-2010
3. Series históricas a nivel mensual por estación
4. Series históricas a nivel diario por estación
5. Series históricas a nivel diario por variable y por estado
6. Base de datos a nivel diario y mensual completa

### MONITOREO DE LA SEQUÍA

La sequía es uno de los fenómenos climáticos que más daño causa a las sociedades y a las actividades económicas de los países que la padecen. Se puede presentar en cualquier tipo de clima y es parte normal de su variabilidad. En México es frecuente su ocurrencia en los estados norteños, debido a que se ubican en la franja desértica del hemisferio norte. La complejidad de este fenómeno y sus efectos no permiten que exista una definición universal, sin embargo, todas coinciden en que se debe a la reducción de lluvias respecto a lo que normalmente ocurre en un periodo determinado.

La sequía es impredecible. Difícilmente se sabe cuándo iniciará, su duración, intensidad o severidad y la extensión territorial en que ocurrirá<sup>27</sup>. Sin embargo, la información histórica y climatológica sí permite conocer su recurrencia y los daños que ocasiona. Por ejemplo, en 1843, en Veracruz “por la sequía, la cosecha de algodón se perdió y sólo se darán 18 mil quintales<sup>28</sup>, en comparación con 60 mil de años buenos. Y, a principios de 1891, la sequía continuó en Tamaulipas, provocando la pérdida completa de las cosechas tardías y la gran mortalidad del ganado<sup>29</sup>.

En junio de 2011 ocurrió la peor sequía de los últimos años, el 85% de la superficie nacional fue afectada. Las pérdidas agrícolas estimadas alcanzaron 15 mil millones de pesos, de acuerdo con la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), mientras que la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) informó la afectación de 2,350 comunidades, equivalentes a 2 millones de habitantes, por el desabasto de agua

<sup>27</sup> *Diario Oficial de la Federación*, 2012.

<sup>28</sup> Quintal: unidad de medida de peso que equivalía a cien libras = 46 kilos (Montané M. J. C.)

<sup>29</sup> Escobar, O. A., “Desastres Agrícolas en México”, *Catálogo Histórico*, tomo 11. Siglo XIX (1822-1900), FCE / CIESAS, 2004.

potable. Entanto que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) dispuso de 290 millones de litros de agua potable para su distribución y realizó la perforación, reposicionamiento o rehabilitación de 331 pozos profundos en todo el país.

A finales de 2002, el SMN inició el monitoreo de la sequía en México, utilizando como base la metodología del Monitor de Sequía de América del Norte (NADM), que analiza condiciones climáticas a gran escala, abarcando Canadá, Estados Unidos y México. Esta metodología utiliza diversos índices climatológicos, edafológicos, vegetativos e hidrológicos.

De ahí que el SMN sea la única institución que realiza el seguimiento de la sequía a nivel nacional, emitiendo, desde febrero de 2014, mapas de sequía quincenalmente.

### Monitoreo de sequía en el SMN

Utiliza un conjunto de índices de sequía para identificar aquellas regiones con los mayores déficits de precipitación, baja disponibilidad de agua y vegetación con estrés hídrico.

El SMN dispone de un conjunto de 358 estaciones climatológicas de largo periodo, con datos de lluvias mayores a 30 años, y que reportan información en tiempo real, a través de los cuales se obtienen índices climatológicos como el Estandarizado de Precipitación (SPI, por sus siglas en inglés) y la anomalía de lluvia —en porcentaje— fuera de lo normal; ambos se calculan en escalas de tiempo de 30, 90, 180 y 365 días. Otros índices se derivan de la información que generan los satélites como el Satelital de Salud de la Vegetación (VHI por sus siglas en inglés) y el Normalizado de Diferencia de la Vegetación (NDVI por sus siglas en inglés).

Adicionalmente, se utiliza el modelo de humedad del suelo Leaky Bucket y el porcentaje de disponibilidad de agua en las presas del país. Otro insumo que se considera en la determinación de la sequía es la opinión de los expertos locales, debido a que ellos conocen los impactos de la sequía regional.

Para categorizar la severidad de la sequía se utiliza la clasificación del NADM, que se basa en la duración e impactos que ocasiona en agricultura, hidrología y vegetación natural. Dicha clasificación considera cinco categorías:

**Anormalmente Seco (D0).** Se trata de una condición de sequedad. No es una categoría de sequía. Se presenta al inicio o al final de un periodo de sequía. Al inicio, debido a la sequedad de corto plazo, puede ocasionar el retraso de la siembra de los cultivos anuales, un limita-



Sequía en la presa Sanaloa en Culiacán, Sinaloa, junio 2013.

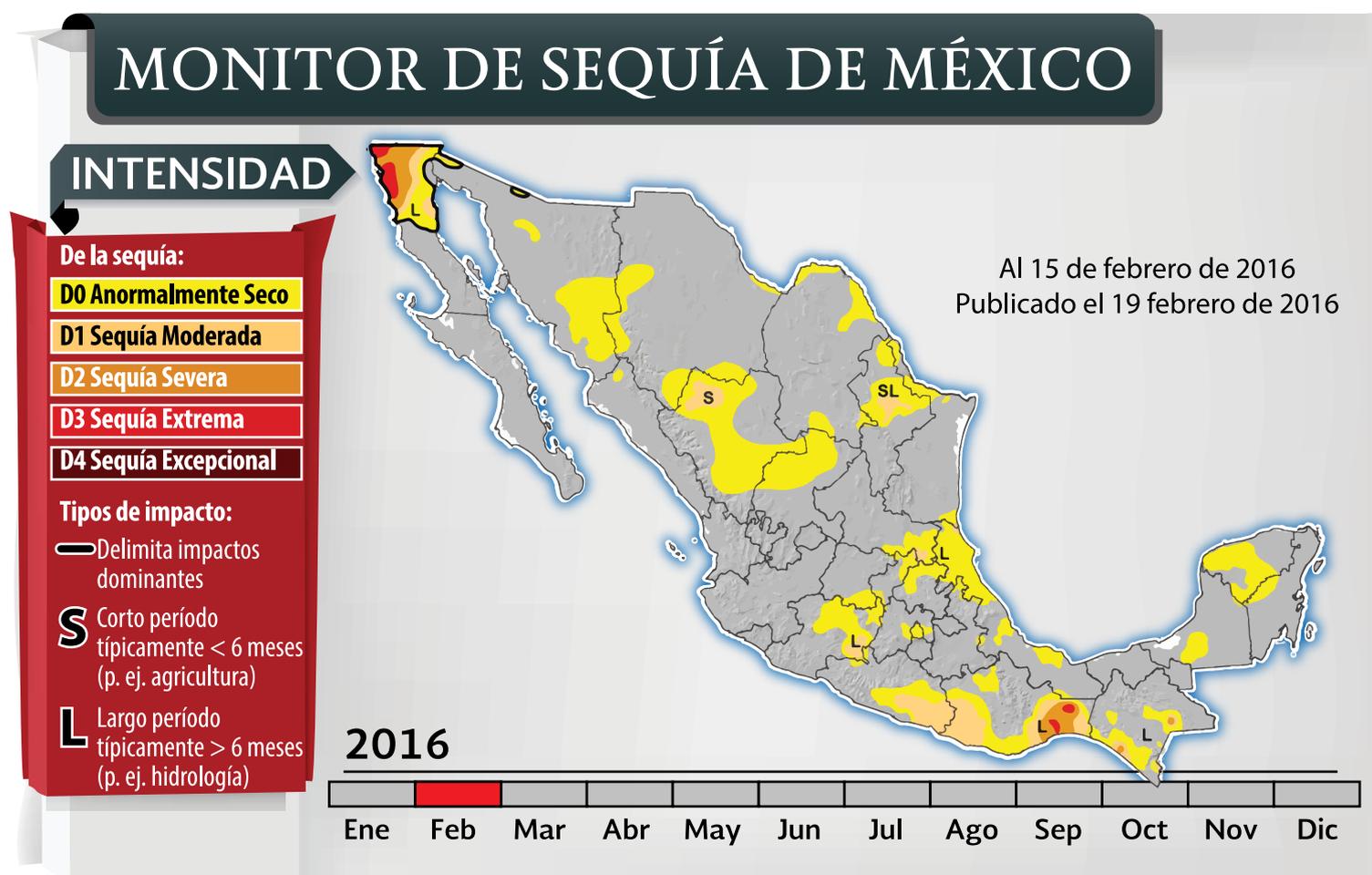
do crecimiento de los cultivos o pastos, además de que eleva el riesgo de incendios. Al final del periodo puede persistir déficit de agua, los pastos o cultivos pueden no recuperarse completamente.

**Sequía Moderada (D1).** Se presentan algunos daños en los cultivos y pastos. Existe un alto riesgo de incendios, bajos niveles en ríos, arroyos, embalses, abrevaderos y pozos. Se sugiere restricción voluntaria en el uso del agua.

**Sequía Severa (D2).** Probables pérdidas en cultivos o pastos, alto riesgo de incendios. Es común la escasez de agua. Se deben imponer restricciones en el uso del agua.

**Sequía Extrema (D3).** Pérdidas mayores en cultivos y pastos. El riesgo de incendios forestales es extremo. Se generalizan las restricciones en el uso del agua debido a su escasez.

**Sequía Excepcional (D4).** Pérdidas excepcionales y generalizadas de cultivos o pastos. Riesgo excepcional de incendios. Escasez total de agua en embalses, arroyos y pozos. Es probable una situación de emergencia debido a la ausencia de agua.



Para generar el mapa de sequía, los índices se despliegan en capas o layers a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG) y mediante un consenso entre los expertos de sequía se trazan los polígonos que delimitan la intensidad de la sequía sobre la República Mexicana.

### Productos y Usuarios del Monitor de Sequía en México (MSM)

El Monitor de Sequía se presenta en mapas a nivel nacional y estatal, por organismos de cuenca<sup>30</sup> y consejos de cuenca<sup>31</sup> de (CONAGUA). Incluye una narrativa que describe el com-

portamiento o evolución de la sequía, el conteo de municipios afectados por la sequía, tablas y gráficos de porcentaje de área afectada a nivel nacional, estatal, organismos y consejos de cuenca.

El Monitor de Sequía de México es solicitado por tomadores de decisiones en el ámbito del gobierno federal, autoridades locales (estatales y municipales), la academia y usuarios en general.

### El Monitor de Sequía y el Programa Nacional contra la Sequía (PRONACOSE)

PRONACOSE brinda atención, seguimiento, mitigación y prevención al fenómeno recurrente de la sequía en el territorio nacional. Fue instaurado en enero de 2013 por iniciativa del presidente Enrique Peña Nieto.

El programa tiene por objetivo la elaboración de instrumentos que permitan la gestión integrada de los Consejos de Cuenca en relación al manejo del recurso hídrico bajo los efectos de la sequía, en torno a un nuevo enfoque proactivo y preventivo.

<sup>30</sup> Consejo de Cuenca: La Ley de Aguas Nacionales establece que los consejos de cuenca son órganos colegiados de integración mixta, para la planeación, realización y administración de las acciones de gestión de los recursos hídricos por cuenca hidrológica o por región hidrológica. De acuerdo a la ley, constituyen instancias de apoyo, concertación, consulta y asesoría entre CONAGUA y los diferentes usuarios del agua a nivel nacional. Al 31 de diciembre de 2011 había 26 consejos.

<sup>31</sup> Organismo de Cuenca o Región Hidrológica - Administrativa: CONAGUA la considera como un área territorial definida de acuerdo con criterios hidrológicos, integrada por una o varias regiones hidrológicas, en la cual se considera a la cuenca hidrológica como la unidad básica para la gestión de los recursos hídricos y el municipio representa, como en otros instrumentos jurídicos, la unidad mínima de gestión administrativa en el país.



Cerca al fin de año una corriente cálida desplaza el agua fría.

PRONACOSE es administrado por el gobierno federal, a través de la Comisión Nacional del Agua, y se integra por universidades públicas, centros de investigación y organismos de gobierno, además de especialistas nacionales e internacionales en la materia.

En el PRONACOSE ([www.pronacose.gob.mx](http://www.pronacose.gob.mx)), el MSM representa un eslabón importante dentro de sus lineamientos en el primer componente que se refiere al alertamiento de la sequía.

## LOS FENÓMENOS DE EL NIÑO Y LA NIÑA

### *El Niño/La Niña*

Aunque los vientos alisios son marcadamente continuos, varían de mes en mes y de año en año, principalmente en el Pacífico Oeste. Uno de los mecanismos que dan origen

a esta variabilidad es la Oscilación de Madden–Julian<sup>32</sup>, si estos vientos se debilitan o cambian de dirección, el sistema Oceánico–Atmosférico en las regiones ecuatoriales del Océano Pacífico pueden cambiar a un estado de *El Niño*.

A lo largo de las costas de Sudamérica los vientos provocan surgencia de agua fría, rica en nutrientes y que soporta gran población de peces en especial la anchoveta. Cerca al fin de año, una corriente cálida pobre en estos nutrientes desplaza el agua fría dejando las zonas con poca producción para la pesca. Este comportamiento fue observado por los residentes de estas zonas desde 1891. Sin embargo, no fue hasta 1957 donde se presentó un caso catalogado como excepcional y el cual llamó la atención de los meteorólogos

<sup>32</sup> McPhaden, M. J., Genesis and evolution of the 1997–1998 *El Niño*, *Science*, 1999, 283, 950–954.

y oceanógrafos<sup>33</sup>. Debido a que estas condiciones se presentaban frecuentemente alrededor de la Navidad, los residentes lo llamaron *El Niño*, en asociación con el nacimiento del niño Jesús<sup>34</sup>.

Así, el término de *El Niño* fue originalmente usado para describir una corriente débil y cálida que se desplazaba hacia el sur, en las costas de Perú y Ecuador, y sólo esporádicamente este término también fue relacionado a grandes calentamientos inusuales que ocurrían pocos años y cambiaban claramente la fauna marina y ecología del lugar. Sin embargo, estos calentamientos cercanos a la costa están relacionados con un gran calentamiento anómalo en la temperatura de la superficie del mar (TSM) en la línea internacional de cambio de fecha (Pacífico central), y que está relacionada con grandes cambios en los patrones globales atmosféricos<sup>35</sup>. La componente atmosférica relacionada a estos cambios es llamada Oscilación del Sur, la cual se caracteriza por un vaivén interanual en la presión a nivel del mar tropical entre el Océano Pacífico Este y Oeste, provocando un debilitamiento o fortalecimiento de los vientos alisios en el Pacífico tropical<sup>36</sup>.

A estos dos fenómenos, en conjunto, se les llamó *El Niño* Oscilación del Sur (ENOS), siendo *El Niño* la fase positiva o cálida de la oscilación. La fase opuesta, negativa o fría, es conocida como *La Niña*, que consiste en el enfriamiento del Pacífico tropical<sup>37</sup>.

Definir *El Niño*, sin duda, es difícil por las múltiples y divergentes interpretaciones científicas de los impactos que puede provocar. Sin embargo, la Organización Meteorológica Mundial, señala que este fenómeno presenta condiciones anormales en los valores de la TSM en la región del Océano Pacífico tropical. La TSM se considera anormal cuando sus registros son en promedio de 0.5°C o más por arriba para la fase cálida<sup>38</sup> de la media en el periodo 1971-2000, en cinco trimestres consecutivos. La región del Océano Pacífico en la que la TSM se observa constantemente para analizar dichas condiciones, se conoce como la región Niño 3.4, y corresponde al área geográfica comprendida entre 120°W-170°W

33 Philander, S. G., *El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation*, Academic Press, 1990, pp. 289.

34 Trenberth, K. E., *The definition of El Niño*, Bull., 1997, Amer. Meteor. Soc., 78, 2771-2777.

35 Trenberth, K. E., *The definition of El Niño*, op. cit., 1997.

36 Ahrens, C. D., *Meteorology today: An introduction to weather, climate, and the environment*, 9ª ed., Belmont, CA, 2009, Brooks/Cole, pp. 549.

37 Trenberth, K. E., *The definition of El Niño*, op. cit., 1997.

38 0.5 °C por abajo para la fase fría o *La Niña*.



Los registros provenían de investigaciones de diversos países.

y 5°S- 5°N, siendo la principal de las cuatro regiones de monitoreo. En el caso donde las condiciones oceánicas son cercanas a la normalidad se dice que es un año Neutral<sup>39</sup>.

### Monitoreo de *El Niño*

El Pacífico tropical es vasto y raramente puede o es visitado por alguna embarcación para realizar mediciones *in situ*. Las anomalías que pueden presentarse debido a ENOS pueden variar mucho.

39 Magnun, L. J., McClurg, D. C., Stratton, L. D., Soreide, N. N., McPhaden, M. J., *The tropical atmosphere ocean (TAO)*, 1998, disponible en <[http://www.pmel.noaa.gov/tao/proj\\_over/pubs/argos.html](http://www.pmel.noaa.gov/tao/proj_over/pubs/argos.html)>, consultado el 15 de marzo del 2015.

# OSCILACIÓN DEL SUR

## EL NIÑO

El nombre de "El Niño" se debe a la asociación de este fenómeno con la llamada corriente del Niño, la cual era conocida de tiempo atrás por los pescadores del puerto de Paita al norte de Perú, que observaron que las aguas se calentaban intempestivamente en la época de las fiestas navideñas y los cardúmenes o bancos de peces desaparecían de la superficie oceánica, debido a una corriente caliente procedente del Golfo de Guayaquil (Ecuador). A este fenómeno le dieron el nombre de corriente de El Niño, por su asociación con la época de la Navidad y el Niño Jesús.

Aguas relativamente cálidas sustituyen a las frías, que al ascender aportaban una vasta y variada fauna marina a la costa americana. Cae la pesca bruscamente.

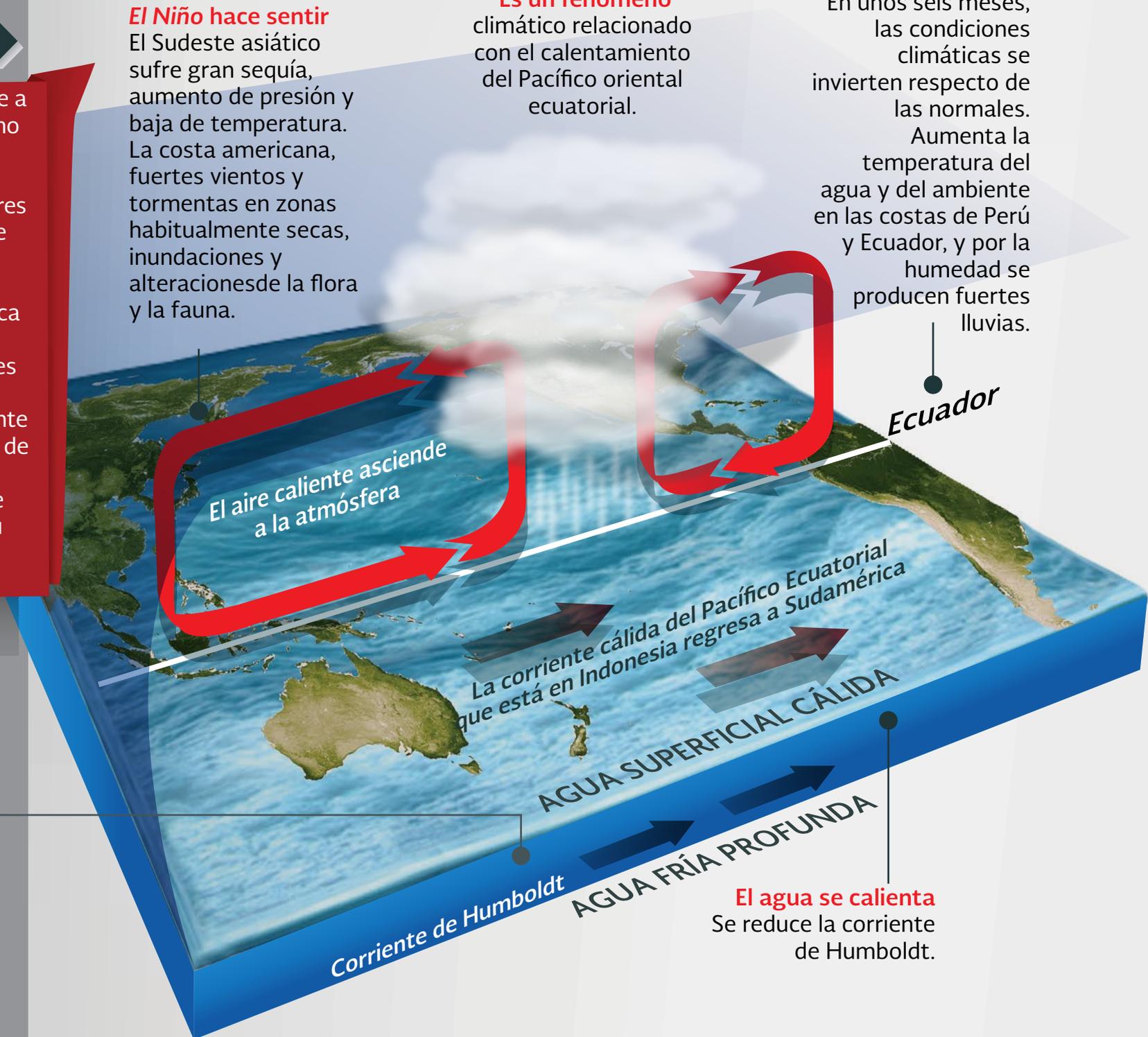
### El Niño hace sentir

El Sudeste asiático sufre gran sequía, aumento de presión y baja de temperatura. La costa americana, fuertes vientos y tormentas en zonas habitualmente secas, inundaciones y alteraciones de la flora y la fauna.

**DURACIÓN**  
9 a 18 meses

**Es un fenómeno** climático relacionado con el calentamiento del Pacífico oriental ecuatorial.

**Se invierte el clima**  
En unos seis meses, las condiciones climáticas se invierten respecto de las normales. Aumenta la temperatura del agua y del ambiente en las costas de Perú y Ecuador, y por la humedad se producen fuertes lluvias.



### Una corriente fría

El desalojo total de las masas de agua cálida de la costa occidental de América del Sur genera temperaturas más frías de lo normal también en la superficie, con un aumento de la presión y una baja de la humedad.

### FRECUENCIA

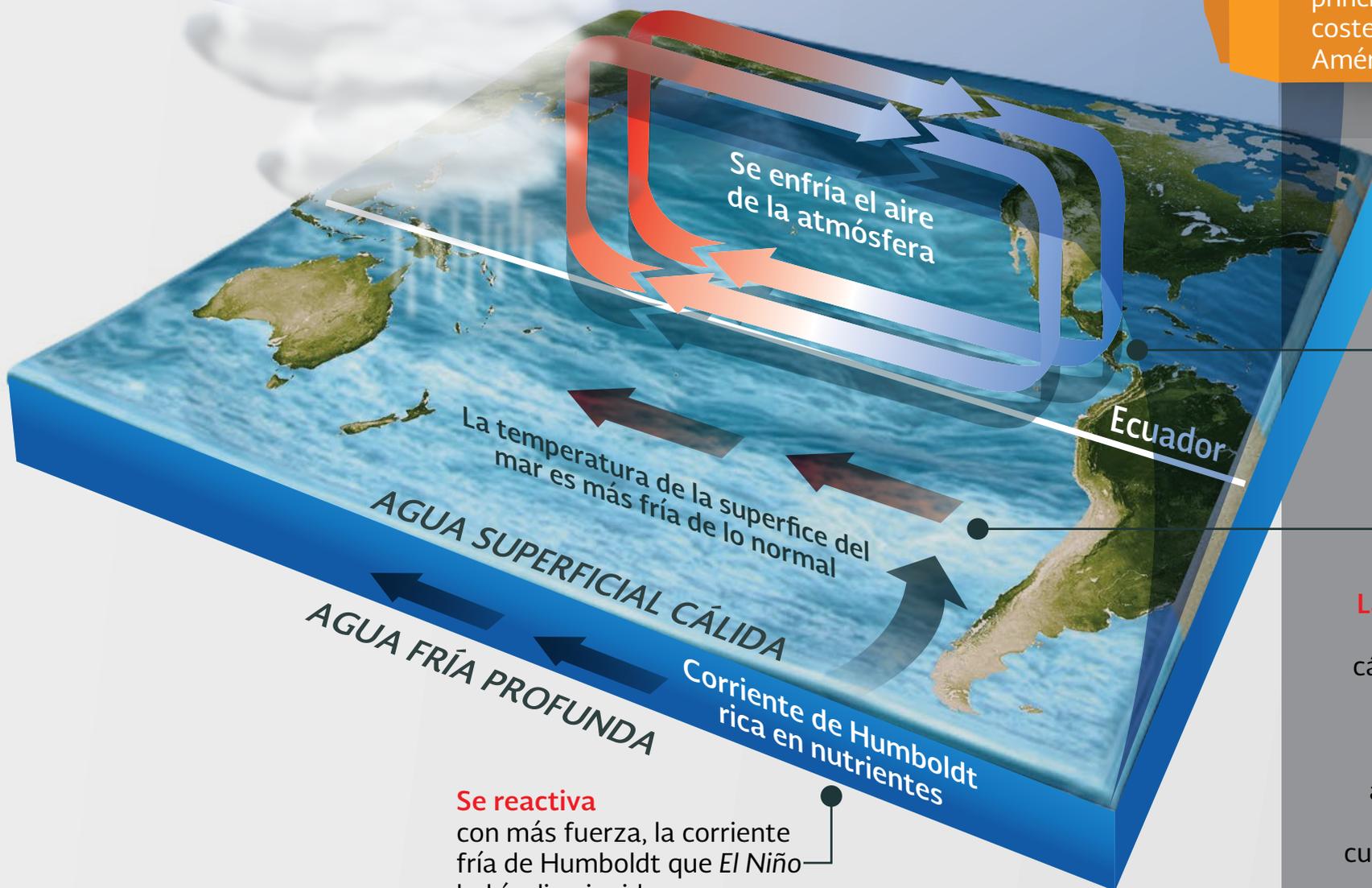
2 a 7 años

### Contrapartida

El regreso de las condiciones normales después de *El Niño* puede ser el preámbulo del fenómeno inverso, llamado *La Niña*.

## LA NIÑA

La fase de enfriamiento recibe el nombre de *La Niña*. Este fenómeno, en sus manifestaciones más intensas, provoca estragos en la zona intertropical y ecuatorial debido a las intensas lluvias, afectando principalmente a la región costera del Pacífico de América del Sur.



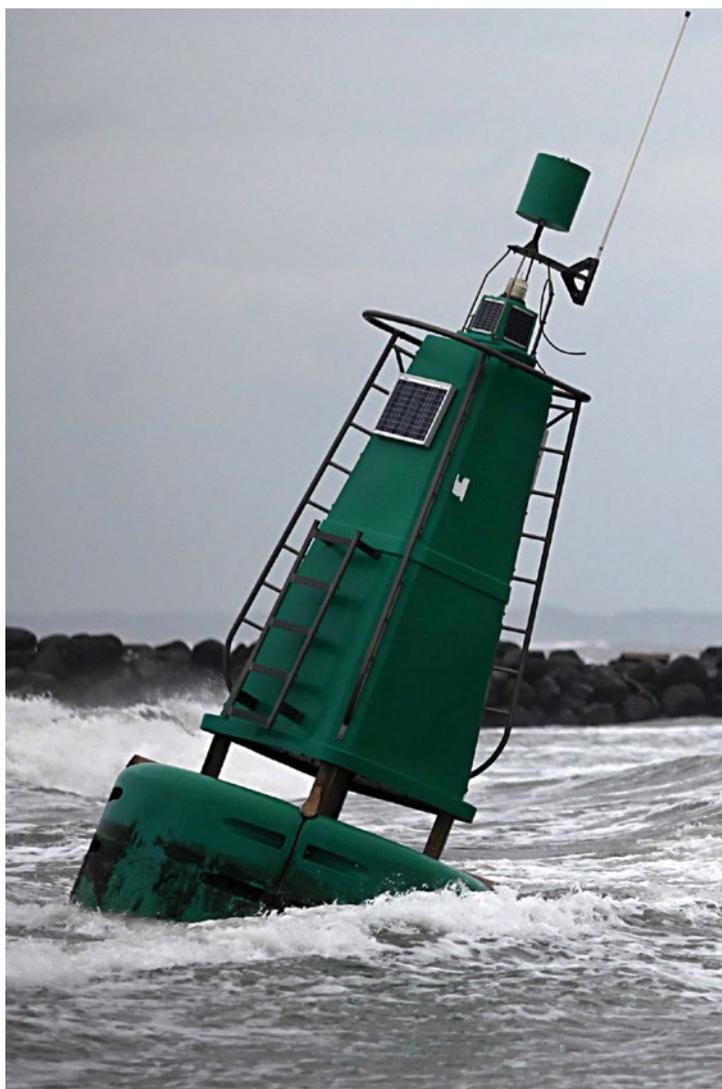
En Guatemala se producen lluvias excesivas.

La masa de agua relativamente cálida se desplaza por completo hacia el Pacífico occidental. El ascenso de agua fría bloquea cualquier corriente cálida al Este.

### Se reactiva

con más fuerza, la corriente fría de Humboldt que *El Niño* había disminuido.

Anteriormente, los registros con los que se contaba eran pocos, obtenidos de mediciones de buques de diversos países. Hoy en día, los datos en tiempo real provienen de varias fuentes, incluida una red avanzada de boyas oceánicas ancladas que cruza el Pacífico ecuatorial<sup>40</sup>. La primera boya que fue exitosamente anclada fue en 1976, por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés)<sup>41</sup>, desde entonces nuevos anclajes se han agregado y mejorado, generando así el sistema de boyas de observación de la atmósfera y el océano tropical



Hoy en día los datos provienen, entre otras fuentes, de una red de boyas oceánicas ancladas. Boya cercana al puerto de Veracruz, enero de 2013.

40 METED (2011) *Introducción a la meteorología tropical*, 2ª ed., UCAR, 2011, disponible en: <<http://www.meted.ucar.edu>>, consultado 16 de marzo de 2015.

41 McPhaden, M. J., Busalacchi, A. J., Cheney, R. y otros, *The Tropical Ocean-Global Atmosphere (textsctoa) observing system: A decade of progress*, Journal of Geophysical Research, 1998, pp. 14,169–14,240.

TAO/TRITON (Tropical Atmosphere Ocean), esfuerzo realizado en colaboración multinacional entre Estados Unidos, Japón, Corea, Taiwán y Francia, con una red de 70 boyas ancladas, que miden una gran gama de variables, siendo de gran ayuda para la detección y predicción de variaciones climáticas en el Océano Pacífico, entre ellas ENOS<sup>42</sup>. Además, actualmente se emplean nuevas herramientas, como la teledetección.

Para facilitar el estudio y comportamiento de ENOS, fue necesario realizar cinco áreas de monitoreo de la temperatura superficial del mar, donde, con los datos obtenidos, se realizan índices de monitoreo. Las regiones *El Niño* 1 y *El Niño* 2 fueron inicialmente sugeridas para supervisar las condiciones oceánicas costeras de Suramérica, donde *El Niño* genera grandes impactos económicos. Las regiones *El Niño* 3 y *El Niño* 4 son más grandes y comprenden gran parte del Pacífico ecuatorial, e inicialmente fueron elegidas porque se consideraba que era donde ENOS se reflejaba en la superficie oceánica, además de ser regiones estratégicas debido al paso de buques que podían realizar mediciones<sup>43</sup>. Posteriormente se propone una nueva región para realizar un nuevo índice de monitoreo, la región *El Niño* 3.4, donde muestra cómo las condiciones de un evento de *El Niño* o *La Niña* se reflejan con mejor correlación, en una región del Pacífico central, comprendiendo básicamente parte de las regiones 3 y 4. Siendo ésta última la más apta para vigilar la variabilidad de la TSM.

Aunque existen varias formas de monitoreo de la variabilidad de la TSM, una de las más aceptadas es el Índice Oceánico de *El Niño* (ONI, por sus siglas en inglés) el cual se define como la media de tres meses de la desviación de la temperatura de la superficie del mar respecto de lo normal para la región *El Niño* 3.4 del Pacífico. Los valores medios se basan en el conjunto de datos de reconstrucción extendida de la TSM, que constituye un análisis histórico y homogéneo de la TSM<sup>44</sup>. Además del ONI, se puede encontrar el Índice de la Agencia Meteorológica de Japón (JMA), el Índice ecuatorial de la Oscilación del Sur y el Índice Multivariado de ENOS (MEI); este último, comprende diferentes variables atmosféricas y oceánicas.

42 Magnun, L. J., McClurg, D. C., Stratton, L. D., Soreide, N. N., McPhaden, M. J., *The tropical atmosphere ocean (TAO)*, op. cit., 1998.

43 Barnston, A. C., Chelliah, M., Stanley G. B., *Documentation of a Highly ENSO – Related SST Region in the Equatorial Pacific*, Atmosphere – Ocean, 1997, pp. 367-383.

44 Kousky, V. E., Higgins, R. W., *An alert classification system for monitoring and assessing the ENSO cycle*, Weather Forecasting, 2007, pp. 22, 353-371.

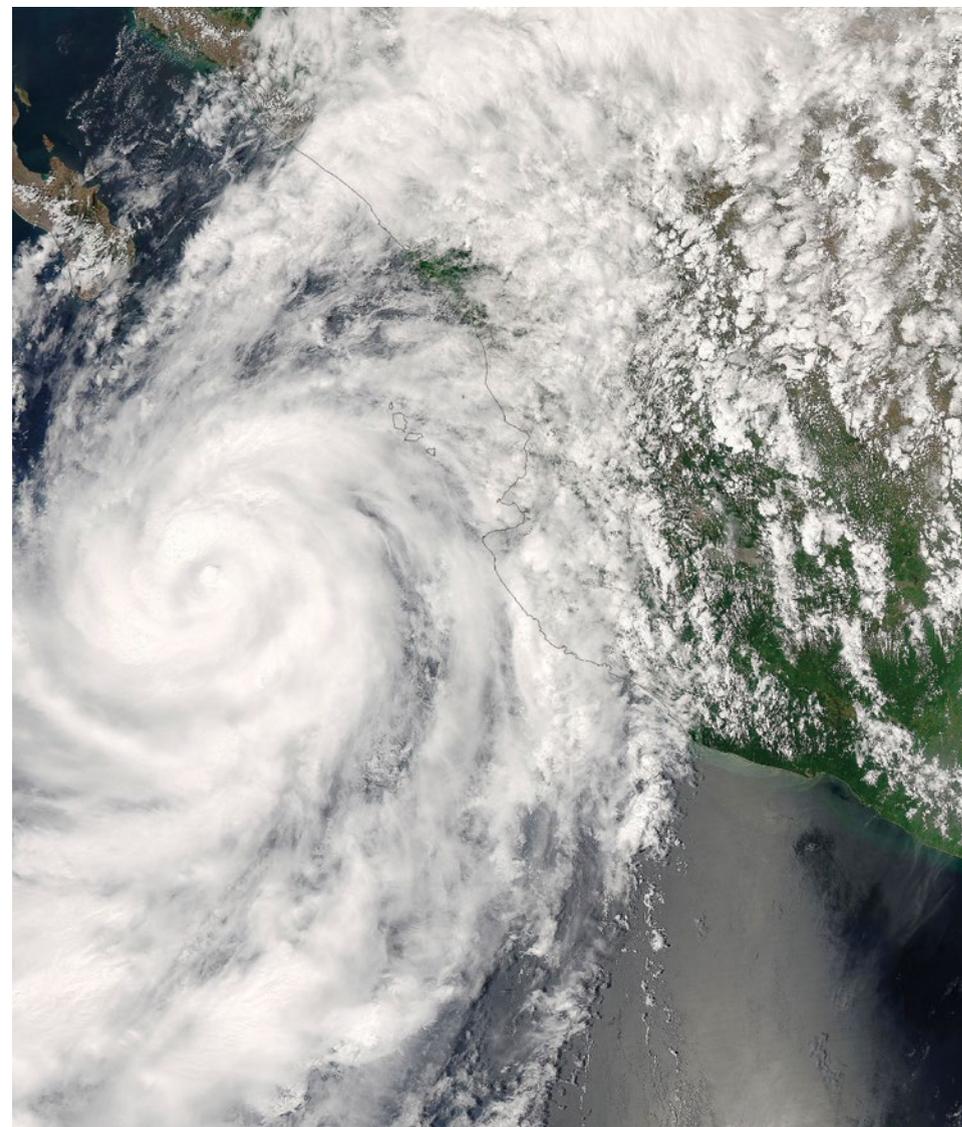
Para efectos de monitoreo de la evolución de ENOS, también se pueden utilizar otros tipos de índices que emplean por ejemplo el viento en niveles bajos, anomalías de radiación de onda larga, vientos en altura entre otros, sin embargo, es necesario señalar que ningún índice de ENOS en forma individual es capaz de representar toda la variabilidad del fenómeno<sup>45</sup>, debido a su complejidad.

### Teorías de formación

El fenómeno *El Niño* – Oscilación del Sur es un proceso acoplado océano-atmósfera, gobernado por diversos procesos de retroalimentación de diferentes escalas espaciales y temporales<sup>46</sup>.

Desde mediados del siglo XX se mencionó como un mecanismo de inicio de formación del fenómeno *El Niño* – Oscilación del sur (ENOS) el proceso de retroalimentación existente entre la TMS y los vientos superficiales a lo largo del Pacífico ecuatorial, afectando de manera importante la variabilidad de la circulación de Walker<sup>47</sup>. En la actualidad, diversas investigaciones mencionan varios procesos físicos asociados a la retroalimentación entre diferentes capas del océano<sup>48</sup>, y la generación y propagación de ondas oceánicas y atmosféricas (ondas de Kelvin, ondas de Rossby) asociadas al comportamiento del viento cerca de la superficie del mar en el Pacífico Occidental<sup>49</sup>.

En los últimos años se han desarrollado diversas teorías y modelos con la finalidad de entender los procesos físicos atmosféricos y oceánicos relacionados con la variabilidad del ENOS y sus fases, entre las que se pueden mencionar: The Delayed Action Oscillator, Western Pacific Oscillator, Advective-Reflective Oscillator y, finalmente, Recharge-Discharge Oscillator, así como modelos de diversa complejidad. Algunas teorías mencionan que el fenómeno ENOS es inducido por fenómenos estocásticos oceánicos y atmosféricos<sup>50</sup>, entre los que se puede mencionar a las rachas de vientos del Oeste<sup>51</sup>.



En la formación de ENOS influye en la temperatura del mar y los vientos superficiales.

Además de los diferentes mecanismos de formación del fenómeno ENOS y los procesos involucrados en el cambio de fase, se han identificado dos tipos de eventos *El Niño*, asociados a la localización en el Pacífico tropical de las anomalías positivas de TMS<sup>52</sup>. Estos fenómenos se conocen como ENOS del Pacífico Este y ENOS del Pacífico Central, también conocido como *El Niño Modoki*<sup>53</sup>, cuya evolución e impactos globales difieren de manera significativa<sup>54</sup>.

45 Penland, C., Magorian, T., *Prediction of Niño 3 sea-surface temperatures using linear inverse modeling*, Journal of Climate, 1993, pp. 1067-1076.

46 Sheinbaum P. J., *Current theories on El Niño-southern oscillation: A review*, Geofísica Internacional, 2003, pp. 42, 3, 291-305.

47 Gill, A. E., *Some simple solutions for heat-induced tropical circulation*, Quarterly Journal of Royal Meteorological Society, 1980, pp. 106, 447-462.

48 Dijkstra, H. A. *The ENSO phenomenon: theory and mechanisms*, Adv. Geosci., 2006, pp. 6, 3-15.

49 Gill, A. E., *Some simple solutions for heat-induced tropical circulation*, op. cit., 1980.

50 Lau, K. M., *Elements of a stochastic-dynamical theory of the long-term variability of the El Niño-Southern Oscillation*, J. Atmos. Sci., 1985, pp. 42, 1552-1558.

51 Gebbie, G., Eisenman, I., Wittenberg, A. T., Tziperman, E., *Modulation of westerly wind bursts by sea surface temperature: A semi-stochastic feedback for ENSO*, J. Atmos. Sci., 2007, pp. 64, 3281-3295.

52 Wang, C., Weisberg, R. H., *The 1997-98 El Niño evolution relative to previous El Niño events*, Journal of Climate, 2000, pp. 13, 488-501.

53 Ashok, K., Behera, S. K., Rao, S. A., Weng, H., Yamagata, T., *El Niño Modoki and its possible teleconnection*, J. Geophys. Res., 2007, 112, C11007, doi:10.1029/2006JC003798.

54 Wang, C., Weisberg, R. H., *The 1997-98 El Niño evolution relative to previous El Niño events*, op.cit., 2000.

A pesar de los grandes avances, tanto en la observación y en la predicción de este fenómeno, aún quedan muchas preguntas sobre los mecanismos físicos que dominan la variabilidad estacional del ENOS, es decir, el cambio de fase de *El Niño* a *La Niña*<sup>55</sup>

### *El Niño* – Oscilación del Sur y el clima

Dada la variabilidad del ENOS, los impactos sociales y económicos pueden ser diversos, pasando por la industria pesquera hasta la pérdida o alteración de ecosistemas<sup>56</sup> tanto a escala global como regional. Por eso, las diferentes fases



Durante *El Niño* aumenta el número de ciclones tropicales en el Pacífico oriental.

del ENOS tienen diversas consecuencias en el clima, ocasionando sequía en regiones de Australia, sureste de Asia, y Centro y Sudamérica en verano durante la fase *El Niño*, y condiciones húmedas y frías durante la fase de *La Niña*, de acuerdo a la NOAA.

Existen actualmente diversos fenómenos climáticos y meteorológicos modulados por el evento ENOS entre los que se encuentran el monzón de Norteamérica, el monzón de Asia, huracanes en el Atlántico y en el Pacífico, y temperaturas altas y precipitación en diversas regiones localizadas a lo largo del continente americano, el sureste de Asia, Australia y algunas regiones de África.

En el caso de los ciclones tropicales, se ha documentado que las fases cálidas (*El Niño*) están asociadas a un incremento en el número de ciclones tropicales y huracanes en la cuenca del Pacífico oriental y una disminución en la región del Golfo de México y el Caribe<sup>57</sup>, así como en la estacionalidad de la temporada y las zonas de formación y trayectoria de los ciclones tropicales<sup>58</sup>.

En México se ha documentado que el fenómeno ENOS tiene gran influencia sobre el comportamiento de la temperatura y la precipitación en verano e invierno<sup>59</sup>, con un aumento en la precipitación invernal en el noroeste de México durante una fase *El Niño* y anomalías negativas de precipitación en la mayor parte de México y Centroamérica en los meses de verano de la misma fase. En el caso de *La Niña*, los patrones de anomalía se invierten ocasionando precipitaciones por debajo de lo normal en el noroeste del país durante el invierno. Cabe mencionar que estos patrones observados pueden variar dependiendo de la intensidad del fenómeno ENOS en sus diferentes fases así como de su interacción con oscilaciones de mayor escala temporal, como la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés).

### PREDICCIÓN CLIMÁTICA Y APLICACIONES

La Organización Meteorológica Mundial define a la predicción climática como una declaración probabilística de las condiciones climáticas futuras en escalas de tiempo que

55 Sheinbaum P. J., *Current theories on El Niño-southern oscillation: A review*, op. cit, 2003.

56 Arntz, W., Tarazona, J., "Effects of El Niño on benthos, fish and fisheries off the South American Pacific coast", en Glynn, P. W. (ed.), *Global ecological consequences of the 1982-83 El Niño southern oscillation*. Oceanography Series 52, Elsevier, Amsterdam, 1990, pp. 323-360.

57 Gray, W. M., *Atlantic Seasonal Hurricane Frequency. Part I: El Niño and 30 mb Quasi-Biennial Oscillation Influences*, Mon. Wea. Rev., 112, 1984, pp. 1649-1668.

58 Pielke, R. A., Landsea, C. W., *La Niña, El Niño, and Atlantic hurricane damages in the United States*, Bull. Am. Meteorol. Soc., 8010, 1999, pp. 2027-2033.

59 Magaña, V. O., Vázquez, J. L., Pérez, J. L., Pérez, J. B., *Impact of El Niño on precipitation in Mexico*, Geofísica Internacional, 2003, pp. 3, 42, 313-330.

van desde la estacional hasta la decadal, basada en condiciones conocidas en el presente y suposiciones de los procesos físicos que determinarán los cambios futuros.

Durante la década de los 80, del siglo XX, el SMN recurrió a la estadística para realizar pronósticos estacionales analizando la información proveniente de las redes de medición, y en los 90 se iniciaron los primeros esfuerzos por relacionar el comportamiento de las variables climatológicas con patrones oceánicos y atmosféricos. En los últimos años se busca consolidar las técnicas estadísticas, el uso de modelos globales del clima, mejorar la comprensión de las teleconexiones, y diversificar los productos en materia de pronóstico estacional, considerando su evaluación y determinación de su habilidad considerando las necesidades de los usuarios.

Los productos del pronóstico estacional son empleados por diversos sectores<sup>60</sup> como una práctica operacional emergente con diversas aplicaciones sociales: el sector hídrico, por ejemplo, los emplea para la administración de presas y gestión de crecidas; el agrícola para planeación de cultivos, prevención de plagas y enfermedades, diagnóstico de sequía, pronóstico de rendimiento de cultivos y seguros agropecuarios; el forestal para programar las plantaciones forestales, salud forestal y prevención de incendios forestales; Protección Civil para gestión de inundaciones; el sector salud para la prevención de enfermedades; los pequeños productores agrícolas para planear sus siembras y cosechas, y los sectores industrial y de servicios para comercialización de productos.

El estudio del comportamiento y comprensión del clima es aún materia de investigación y desarrollo tecnológico en muchos centros de investigación nacional e internacional; aún nos enfrentamos a los desafíos de conocer y caracterizar los patrones oceánicos y atmosféricos que determinan y/o influyen el clima tanto a escala global como regional; al respecto se han realizado esfuerzos por relacionar patrones de escala global con los regionales y locales<sup>61</sup>.

El proceso de elaboración del pronóstico estacional requiere del conocimiento del comportamiento de los for-

zantes atmosféricos y oceánicos que modulan el clima en México; hasta ahora uno de los forzantes más investigados y que tiene relación con la precipitación y la temperatura es el fenómeno del ENOS ; no obstante hay otras oscilaciones y/o perturbaciones oceánicas y atmosféricas que juegan un papel importante en las variaciones climáticas como la oscilación Madden-Julian, la oscilación Decadal del Pacífico, la oscilación del Atlántico Norte, el monzón de Norteamérica, la Zona Intertropical de Convergencia, los frentes fríos y las ondas tropicales, entre otros.



La predicción climática apoya la planeación agrícola.

60 Barnston G. A., Kumar A., Goddard L., Hoerling P. M., *Improving Seasonal Prediction Practices Through Attribution of Climate Variability*, American Meteorological Society, 2005, pp. 59-72.

61 Cavazos T., *Large-Scale Circulation Anomalies Conductive to Extreme Precipitation Events and Derivation of Daily Rainfall in Northeastern Mexico and Southeastern Texas*, Journal of Climate, Vol. 12, 1998, pp. 1506-1523.



Monitoreo del norte del continente americano.

### Principales moduladores del clima en México

La observación del tiempo es casi tan antigua como la misma humanidad, e indiscutiblemente el avance de la tecnología, la ciencia y la cooperación internacional han revolucionado la comprensión de los patrones de interacción océano – atmósfera, y nuestra capacidad de proporcionar perspectivas hábiles en escalas de tiempo más largas. De ahí que, se haya mejorado significativamente la capacidad de predecir patrones y las fases de las oscilaciones, además de las anomalías a las que se les ha vinculado de acuerdo a sus escalas de movimiento en la atmósfera y estacionalidad. A este tipo de asociaciones entre variables climáticas separadas geográficamente por largas distancias se les conoce como teleconexiones. En el caso de nuestro país, dada su ubicación, esta le permite alternar con la fuerte influencia no sólo debida a perturbaciones tropicales propias de la variabilidad interanual tropical y subtropical, sino a patrones y oscilaciones procedentes de latitudes medias a altas. Sin embargo, no

son las únicas, existen oscilaciones de mayores escalas de tiempo que impactan a nuestro país que van desde la escala intraestacional, anual hasta la década. Algunos de estos patrones los describiremos en el siguiente apartado.

### Osciladores y patrones atmosféricos y oceánicos

Fundamentalmente la circulación general de la atmósfera se encuentra relacionada al balance de energía, los procesos de transporte y el modelo de celdas, es decir, al calentamiento diferencial y la rotación del planeta, la topografía y la dinámica de los fluidos de la atmósfera y el océano<sup>62</sup>. Lo que provoca intercambios a grandes distancias, conocidos como teleconexiones. Básicamente es una interacción océano–atmósfera entre puntos terrestres distantes, que da lugar a modos persistentes y recurrentes de variabilidad de baja frecuen-

<sup>62</sup> The COMET, *Introduction to Tropical Meteorology*, 2nd edition, 2015, disponible en <<https://www.meted.ucar.edu/tropical/>>



La AO es un índice climático de la condición de la circulación atmosférica sobre el Ártico.

cia de presión atmosférica y anomalías de circulación oceánica<sup>63</sup>. La variabilidad de estos patrones de teleconexión se ha medido a través de índices de intensidad, obtenidos de su vinculación con los regímenes de precipitación y temperatura. La teleconexión más prominente de interacción océano-atmósfera es el fenómeno de *El Niño*–Oscilación del Sur (ENOS). Dentro de los patrones y oscilaciones que se analizan a lo largo del año, y de acuerdo a la temporada se encuentran:

**Oscilación del Ártico (AO).** Esta oscilación es un índice climático de la condición de la circulación atmosférica sobre el Ártico<sup>64</sup>. Se compone de una fase positiva, que muestra alturas geopotenciales por debajo del promedio,

que también se denominan anomalías negativas de altura geopotencial. Durante la fase positiva, la circulación polar es más fuerte que las fuerzas de aire frío y las tormentas permanecen más al norte. La AO con frecuencia comparte fase con la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), y sus fases se correlacionan directamente con las fases de la NAO asociadas a las consecuencias sobre el clima en Estados Unidos de América.

**Oscilación del Atlántico Norte (NAO).** Es una fluctuación a gran escala situada entre la zona de alta presión de las Azores y la baja polar Islandesa en la cuenca del Atlántico norte. Consiste en un dipolo de anomalías de presión de esas regiones. Tanto su fase positiva como negativa son asociadas con cambios en la intensidad y localización de la corriente en chorro (*Jet Stream*) y las trayectorias de las tormentas, y en modulaciones a gran escala de patrones de temperatura y precipitación. Su influencia se extiende

63 N. Kiladis, George y Diaz, Henry F., "Global Climatic Anomalies Associated with Extremes in the Southern Oscillation", *Journal of Climate*, EUA, 1989, pp. 1069–1090.

64 NOAA, *National Weather Service*, Climate Prediction Center, EUA, 2005, 2012, 2015, disponible en <[http://www.cpc.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily\\_ao\\_index/teleconnections.shtml](http://www.cpc.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/teleconnections.shtml)>.



En su fase positiva las temperaturas son superiores al promedio.

desde Norteamérica Central hasta Europa, alcanzando incluso al Norte de Asia<sup>65</sup>.

**Patrón del Pacífico de Norteamérica (PNA).** El patrón de teleconexión del Pacífico de América del Norte es uno de los patrones del clima de influencia más reconocida en el

<sup>65</sup> NOAA, *National Weather Service, op. cit.*, 2005

hemisferio norte en las latitudes medias. Se compone de anomalías en los campos de altura geopotencial (usualmente a 700 o 500 mb) observados sobre el Oeste y el Este de EUA. Es importante indicar que la fase positiva del Patrón PNA se ha encontrado muy influenciada por el fenómeno *El Niño*-Oscilación del Sur (ENOS). La fase positiva presenta alturas geopotenciales por arriba del promedio sobre el occidente de EUA y por debajo de la media al Este de Estados Unidos<sup>66</sup>. La PNA puede caracterizarse por un tren de ondas de Rossby con cuatro centros de acción: dos de un solo signo localizados sobre el Pacífico noreste subtropical y el noroeste de Norteamérica, y dos de signo contrario centrado sobre el Golfo de Alaska y el sureste de EUA, con estacionalidad temporal de aproximadamente dos semanas<sup>67</sup>.

**Patrón del Atlántico Este (EA).** Este patrón es el segundo modo prominente de variabilidad de baja frecuencia sobre el Atlántico Norte, y aparece en todos los meses. El patrón de EA es estructuralmente similar a la NAO, y consiste en un dipolo Norte-Sur de los centros de anomalías que abarcan el Atlántico norte, de Este a Oeste. En ocasiones, el patrón de la EA se interpreta como un desplazamiento hacia el Sur del patrón de la NAO. Sin embargo, el centro de latitud más bajo tiene una fuerte conexión subtropical en asociación con modulaciones en la intensidad de la dorsal subtropical y su ubicación. Este enlace subtropical hace que el patrón de EA sea distinto de la NAO<sup>68</sup>. La fase positiva del patrón de EA se asocia con temperaturas superficiales superiores a la media en Europa en todos los meses, y con temperaturas por debajo del promedio sobre el sur de EUA de enero a mayo, y en el centro-norte de julio a octubre<sup>69</sup>.

**Patrón del Pacífico Este – Pacífico Norte (EP-NP).** Es un patrón de circulación atmosférica presente durante la primavera, verano y otoño, asociado con la posición e intensidad de la corriente de chorro sobre el Pacífico y con la circulación ciclónica y anticiclónica sobre América del norte. Entre los efectos asociados a este patrón, en su fase positiva, las temperaturas son superiores al promedio en el Pacífico nor-

<sup>66</sup> NOAA, *National Weather Service, op. cit.*, 2012

<sup>67</sup> Franzke, C., Feldstein S. B., *The continuum and dynamics of Northern Hemisphere teleconnection patterns.*, *J. Atmos. Sci.*, 2005, 62: 3250–3267.

<sup>68</sup> NOAA, *National Weather Service, op. cit.*, 2012.

<sup>69</sup> NOAA, *National Weather Service, op. cit.*, 2012.

te oriental, así como temperaturas por debajo de lo habitual sobre el norte del Pacífico central y este de Norteamérica<sup>70</sup>.

**Oscilación Cuasi Bienal (QBO).** Es un cambio regular de los vientos en la estratósfera inferior sobre los trópicos, que se propagan hacia abajo alrededor de 1 km/mes. Los regímenes de vientos del Este y Oeste por zonas simétricas alternan regularmente con periodos que varían de aproximadamente 24 a 30 meses<sup>71</sup>. Las características de la QBO son:

- Los regímenes de viento se propagan hacia abajo a medida que pasa el tiempo.
- El periodo de la oscilación es de 20 a 36 meses con una media de alrededor de 28 meses.
- Inicia en los 10 mb y desciende hasta los 100 mb.
- Los vientos del Este son generalmente más fuertes que los vientos del Oeste.
- Los vientos del Oeste duran más que los vientos del Este en los niveles superiores, mientras que ocurre lo contrario en niveles inferiores.
- Los vientos del Oeste se mueven más rápido que los vientos del Este.
- La transición entre regímenes Oeste y Este en ocasiones se retarda entre los 30 y 50 mb.
- Existe una considerable variabilidad de la QBO con su periodo y amplitud<sup>72</sup>.

Los investigadores continúan explorando las conexiones entre la QBO y otros ciclos climáticos. El QBO impacta claramente los patrones tropicales de lluvia y el ENSO pero hasta ahora, no hay conexión definitiva. Incluso se ha encontrado correlacionada a la actividad de los ciclones tropicales.

**Oscilación Madden-Julian (MJO).** Es un disturbio tropical que se propaga hacia el Este alrededor de los trópicos globales con un ciclo en el orden de 30 a 60 días. La MJO tiene un profundo impacto sobre los patrones de precipitación tropical y extratropical, la circulación atmosférica y temperatura de la superficie alrededor de los trópicos y subtropicales globales. Existe evidencia de que la MJO influye en el ciclo de

70 NOAA, *National Weather Service*, op. cit., 2012.

71 Holton, J. R., *Meteorology*, Academic Press Dictionary of Science and Technology, 1992, pp. 1362.

72 Naujokat, B., *An update of the observed Quasi-Biennial Oscillation of stratospheric winds over the tropics*, Journal of the Atmospheric Sciences, vol. 43, 1986, pp. 1873-1877.

ENOS. No causa *El Niño* o *La Niña*, pero puede contribuir a la velocidad de desarrollo y la intensidad de estos episodios<sup>73</sup>.

La MJO es un sistema acoplado océano-atmósfera. Este componente atmosférico se caracteriza por ser una oscilación que se propaga hacia el Este desde el continente marítimo alrededor del Ecuador entre 7 y 5 m/s. La escala espacial atmosférica de la MJO puede ser descrita en términos de una longitud de onda local de aproximadamente 12,000 - 20,000 km<sup>74</sup>.

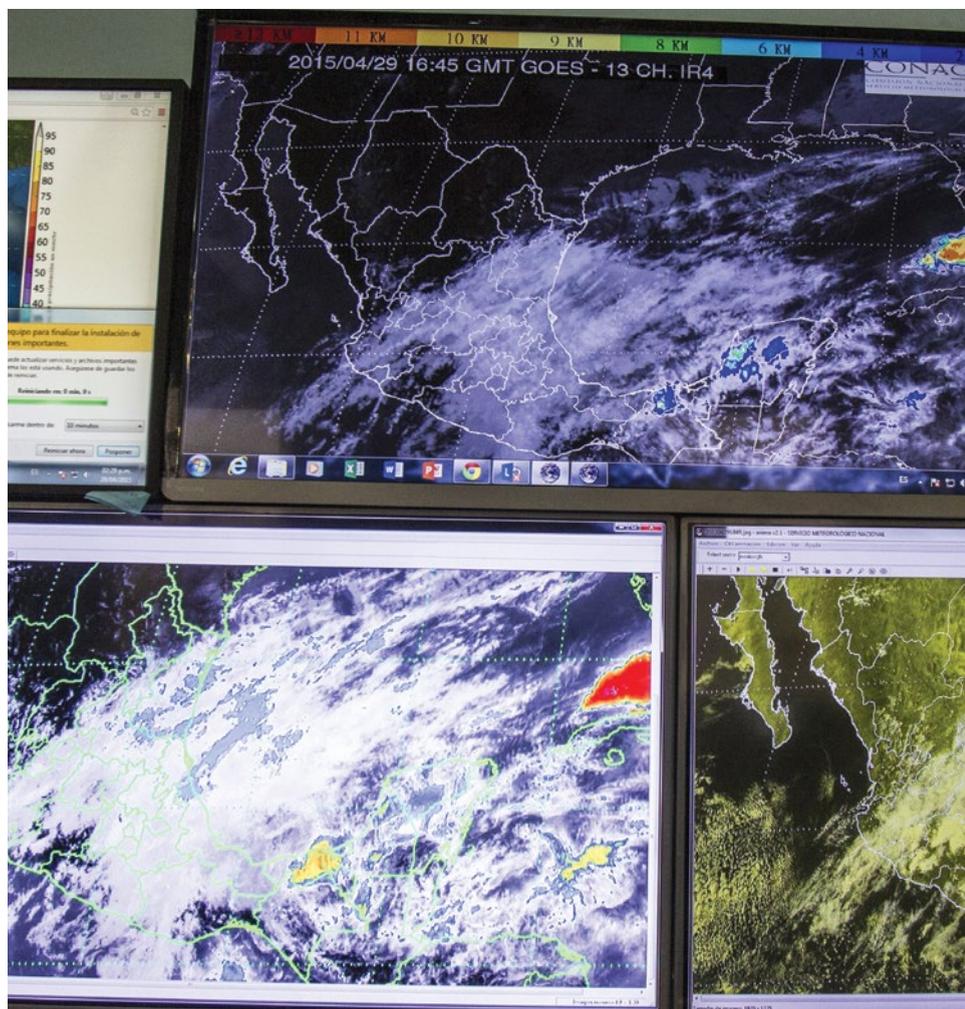
**Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO).** Es una oscilación natural de la temperatura superficial del mar (SST) en el Atlántico norte, que incluye fases cálidas y frías. La diferencia SST entre estas fases cálidas y frías es de aproxi-



La AMO incluye fases cálidas y frías.

73 NOAA, *National Weather Service*, op. cit., 2005.

74 The COMET, *Introduction to Tropical Meteorology*, op. cit., 2015.



La predicción del clima emplea la estadística.

madamente es 0,5°C y su periodo de oscilación va de 20 a 40 años<sup>75</sup>. Tal parece que el AMO ha estado activo al menos los últimos mil años<sup>76</sup>.

**Oscilación Decadal del Pacífico (PDO).** Ha sido descrita como una fluctuación de largo periodo en el Océano Pacífico<sup>77</sup>. Los efectos primarios de la PDO se concentran en el Pacífico norte<sup>78</sup> y suroeste de Norteamérica manifestándose durante el periodo invernal principalmente. De acuerdo con los resultados de diversos autores encontraron que la fase positiva de la PDO favorece las lluvias invernales en el norte de México. La PDO es un patrón de variabilidad climática del Pacífico de carácter similar al ENOS, pero que varía

75 Es un periodo variable que puede durar varias décadas.

76 The COMET, *Introduction to Tropical Meteorology*, op. cit., 2015.

77 Trenberth, K. E., *The definition of El Niño*, op. cit., 1997.

78 Cayan, D. R., Dettinger, M. D., Diaz, H. F., Graham, N. E., *Decadal variability of precipitation over western North America*, J. Climate, no. 11, 1998, pp. 3148—3166.

en una escala de tiempo mucho más larga. La PDO puede permanecer en la misma fase de 20 a 30 años, mientras que los ciclos ENSO típicamente sólo duran de 6 a 18 meses<sup>79</sup>.

**Pronóstico Estadístico del Clima.** La predicción estadística del clima busca prever el estado futuro del clima, basándose en la persistencia o lenta evolución de algunos de los patrones oceánicos y/o atmosféricos así como su variabilidad y la relación entre estos fenómenos y las anomalías de precipitación o temperaturas en lugares distantes, a esta interacción se le conoce como Teleconexión.

El ENSO es uno de los fenómenos climáticos que mejor explica la variabilidad de las lluvias y temperaturas en México, de allí su importancia para predecirlas a escala mensual y estacional, del mismo modo, un número importante de teleconexiones ha puesto de manifiesto la enorme complejidad del sistema climático y cómo sus interrelaciones afectan el comportamiento de los distintos fenómenos que producen o inhiben las precipitaciones a lo largo del país. La predicción de largo plazo es en esencia probabilística y la información es en términos de probabilidades de ocurrencia.

La predicción estadística del clima cae dentro de varios ámbitos de la estadística. Desde lo más básico —como los valores mensuales o estacionales de precipitación o temperatura y sus estadísticas descriptivas (promedios, desviaciones estándar, percentiles)— hasta los métodos multivariados, que permiten entender conjuntos grandes y complejos de datos que se encuentran en un gran número de variables. Muchas de estas técnicas permiten resumir esta información en pocos parámetros, por ejemplo, el desarrollo de índices que representen las fluctuaciones u oscilaciones de los diversos patrones en términos de anomalías.

Entre las técnicas más comunes utilizadas para el pronóstico estadístico se encuentran los análisis de correlaciones canónicas y el de componentes principales para determinar las relaciones entre campos de variables, como la temperatura de la superficie del mar, y generar modelos de pronóstico. Otra técnica muy utilizada es la regresión lineal múltiple que utiliza los índices (variables independientes) para construir modelos que predigan el comportamiento de una variable como la precipitación (variable dependiente).

79 Bond, N. A., Harrison, D. E., *The Pacific Decadal Oscillation, air-sea interaction and central north Pacific winter atmospheric regimes*, Geophys. Res. Lett., 2000, pp. 27, 731-734.

En el Servicio Meteorológico Nacional el pronóstico estadístico actualmente utiliza tres técnicas estadísticas para realizar el análisis de las condiciones probables de precipitación y temperatura.

La primera determina el nivel de asociación lineal entre los índices de un mes y la precipitación (temperatura) de dos a cuatro meses más adelante, para todo el país. Para ello utiliza el coeficiente de correlación de Pearson y se generan los mapas donde se muestra cada uno de los índices utilizados y cómo influyen en la precipitación.

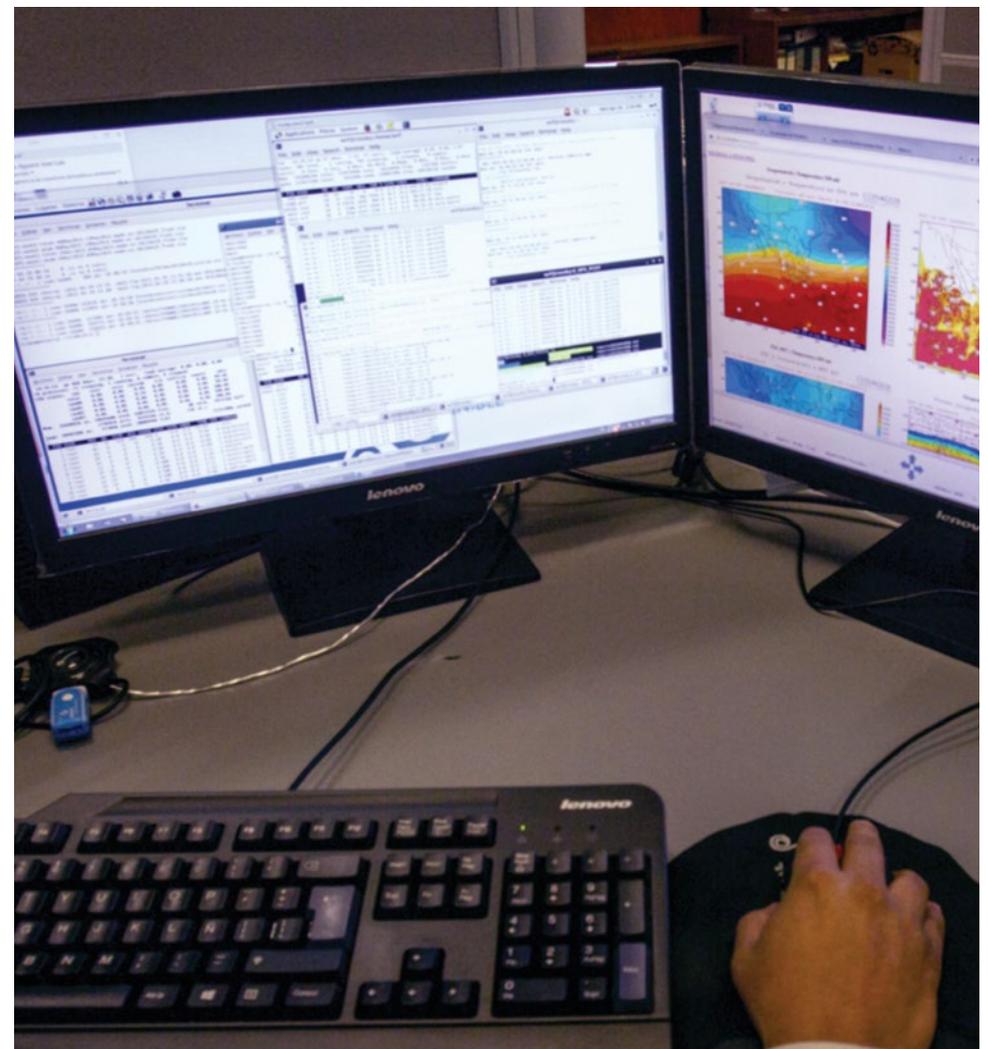
La segunda realiza un análisis de conglomerados. Esta técnica permite agrupar casos en función de sus variables. En el SMN se utiliza para determinar los años/mes que son estadísticamente similares al corriente. Con ellos se elaboran gráficas de series de tiempo para determinar el comportamiento reciente y futuro. De tal modo que se puede evaluar las variaciones que presenten los índices en los meses siguientes. Finalmente se crean los mapas de anomalía de precipitación de cada uno de los años para el mes correspondiente, un mapa del promedio de todos los años/mes similares y otro con la frecuencia de la señal arriba o debajo de lo normal.

La tercera técnica utiliza como base la regresión lineal múltiple, pero aplicada a cada punto de análisis (876 puntos) y por cada grupo predefinido de índices (23 grupos) para cada uno de los meses a predecir. Con estos resultados se elaboran los mapas de precipitación y anomalía de precipitación. De manera similar se elaboran los modelos lineales para cada índice con el objetivo de analizar individualmente cada uno de los patrones de anomalía de lluvia. Con las salidas de todos los modelos se generan cinco productos en los que se busca la señal dominante.

**Ensamble Best FRAC.** Busca los modelos estadísticos (por punto de análisis) que tienen la mayor frecuencia de aciertos por categoría o tercil (debajo, normal y arriba) de los datos simulados. Con cada uno se elabora un nuevo mapa con la señal de los mejores modelos de predicción.

**Ensamble Best Skill.** Se seleccionan los modelos que presentan la correlación más elevada entre los datos simulados por el modelo estadístico y los datos observados (usados para construir el mismo modelo). Con estos se construye un mapa que lleva la señal de los modelos con mayor habilidad de pronóstico.

**Ensamble de Grupos.** Éste se elabora promediando las salidas de los modelos construidos con los grupos de índices.



Estadísticas y mapas de anomalías.

Con él se generan los mapas de anomalías y de probabilidades por categoría o terciles, y tiene por objetivo detectar la señal dominante y su probabilidad.

**Ensamble de Predictores.** Es el promedio de las salidas de los modelos lineales construidos con cada uno de los índices por separado. De éste se obtienen mapas de anomalías y de probabilidades, el objetivo de este producto es detectar la señal que arrojan los índices individualmente y su probabilidad de ocurrencia.

**Ensamble.** Es el promedio de los modelos construidos con grupos y de los de índices individuales. Su propósito es mostrar la señal de todos los modelos y su probabilidad, así como las regiones con mayor incertidumbre.

El pronóstico estadístico del clima se elabora mediante el análisis de los campos de lluvia o temperatura resultantes y sus teleconexiones, haciendo énfasis en los patrones

recurrentes y la intensidad de las anomalías. A pesar del gran avance que se tiene a nivel mundial en el desarrollo de modelos acoplados del clima, la predicción estadística sigue siendo una herramienta muy importante para la previsión de largo plazo, que va de uno a seis meses.

### MODELACIÓN DEL CLIMA TERRESTRE

El avance en el conocimiento de la dinámica de los sistemas naturales es uno de los principales retos a los que se enfrenta la ciencia. No sólo porque se trata de sistemas complejos como los ecosistemas terrestres, la evolución de las especies, procesos turbulentos, intercambio de energía, procesos hidrostáticos, etcétera, sino, porque la comunidad científica ha intentado la modelación de procesos en diversas escalas espaciales y temporales, desde la circulación general de la atmósfera hasta los flujos turbulentos. En la escala global, quizá uno de los sistemas mejor entendidos es el climático, que ha permitido la modelación de los procesos de su dinámica interna.



Existe un esfuerzo global por contrarrestar las actividades contaminantes.

La modelación del clima ha cobrado gran relevancia en las últimas décadas, no sólo por permitir el estudio de las variaciones del clima presente sino, también, por las evidencias de que algunas actividades humanas están modificando la evolución natural del clima y podrían llegar a provocar significativas alteraciones en el futuro cercano<sup>80</sup>. La mejor herramienta de que se dispone para su estudio son los modelos climáticos globales, capaces de reproducir matemáticamente de una forma adecuada los principales procesos que ocurren en los cinco componentes del sistema climático: atmósfera, hidrósfera, criósfera, litósfera y biósfera.

Por su alto costo, este esfuerzo se realiza de manera periódica sólo en los centros mundiales de producción de pronóstico de largo plazo, que han sido designados por la Organización Meteorológica Mundial: Environment Canada (Canadá), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, EUA), Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC, Brasil), MetOffice (Reino Unido), European Centre for Medium-range Weather Forecast (ECMWF, Europa), MeteoFrance (Francia), Hydrometeorological Centre of Russia (Rusia), Beijing Climate Center (China), Korea Meteorological Administration (Corea), Tokyo Climate Centre (Japón), Bureau of Meteorology (Australia).

En México sólo algunas instituciones han incursionado en el uso de modelos climáticos de escala global: el Centro de Ciencia de la Atmósfera de la UNAM (CCA/UNAM) y el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la CONAGUA a través de la implementación de las salidas de modelos globales<sup>81</sup>.

### Modelos Climáticos Globales

La mejor herramienta de que se dispone para el estudio de este complejo sistema son los modelos climáticos. Hay diversos tipos, desde los más sencillos —que permiten comprender el efecto global de diversos forzamientos individuales— hasta los más complejos—, que son capaces de reproducir aceptablemente los principales procesos que tienen lugar en el sistema y que, a la postre, determinan el

80 IPCC, *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*, Equipo de redacción principal: Pachauri, R. K. y Reisinger, A. Ginebra, Suiza, 2007, pp. 104.

81 Guillén-Cadena, M. J., Descripción del modelo acoplado The Climate Forecast System version 2 (CFSv2) para la predicción estacional del clima en México, Universidad Veracruzana, Xalapa, 2015.

## Modelos climáticos globales en el AR4-IPCC

Centro de Modelamiento o Grupo	ID del Instituto	Nombre del modelo
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) and Bureau of Meteorology (BOM), Australia	CSIRO-BOM	ACCESS1.0 ACCESS1.3
Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	BCC	BCC-CSM1.1 BCC-CSM1.1(m)
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales (National Institute for Space Research)	INPE	BESM OA 2.3
College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University	GCESS	BNU-ESM
Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	CCCMA	CanESM2 CanCM4 CanAM4
University of Miami - RSMAS	RSMAS	CCSM4(RSMAS)
National Center for Atmospheric Research	NCAR	CCSM4
Community Earth System Model Contributors	NSF-DOE-NCAR	CESM1(BGC) CESM1(CAM5) CESM1(CAM5.1, FV2) CESM1(FAST-CHEM) CESM1(WACCM)
Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies and National Centers for Environmental Prediction	COLA and NCEP	CFSv2-2011
Centro Euro-Mediterraneo per i Cambiamenti Climatici	CMCC	CMCC-CESM CMCC-CM CMCC-CMS
Centre National de Recherches Météorologiques / Centre Européen de Recherche et Formation Avancée en Calcul Scientifique	CNRM-CER-FACS	CNRM-CM5 CNRM-CM5-2
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with Queensland Climate Change Centre of Excellence	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0
EC-EARTH consortium	EC-EARTH	EC-EARTH
LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences and CESS, Tsinghua University	LASG-CESS	FGOALS-g2
LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences	LASG-IAP	FGOALS-g1 FGOALS-s2

Centro de Modelamiento o Grupo	ID del Instituto	Nombre del modelo
The First Institute of Oceanography, SOA, China	FIO	FIO-ESM
NASA Global Modeling and Assimilation Office	NASA GMAO	GEOS-5
NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	NOAA GFDL	GFDL-CM2.1 GFDL-CM3 GFDL-ESM2G GFDL-ESM2M GFDL-HIRAM-C180 GFDL-HIRAM-C360
NASA Goddard Institute for Space Studies	NASA GISS	GISS-E2-H GISS-E2-H-CC GISS-E2-R GISS-E2-R-CC
National Institute of Meteorological Research/ Korea Meteorological Administration	NIMR/KMA	HadGEM2-AO
Met Office Hadley Centre (additional HadGEM2-ES realizations contributed by Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales)	MOHC (additional realizations by INPE)	HadCM3 HadGEM2-CC HadGEM2-ES HadGEM2-A
Institute for Numerical Mathematics	INM	INM-CM4
Institut Pierre-Simon Laplace	IPSL	IPSL-CM5A-LR IPSL-CM5A-MR IPSL-CM5B-LR
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies	MIROC	MIROC-ESM MIROC-ESM-CHEM
Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	MIROC	MIROC4h MIROC5
Max-Planck-Institut für Meteorologie (Max Planck Institute for Meteorology)	MPI-M	MPI-ESM-MR MPI-ESM-LR MPI-ESM-P
Meteorological Research Institute	MRI	MRI-AGCM3.2H MRI-AGCM3.2S MRI-CGCM3 MRI-ESM1
Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model Group	NICAM	NICAM.09

clima terrestre<sup>82</sup>. Estos modelos se basan en la resolución numérica del conjunto de ecuaciones que expresan las leyes y principios físicos que rigen la dinámica tridimensional de los procesos fundamentales que tienen lugar en cada componente del sistema climático, así como los intercambios de

energía y masa entre ellos. Por esta razón, a los modelos que pueden simular las interacciones entre los cinco componentes del sistema climático global de forma acoplada se les da el nombre de Modelos del Clima Global acoplados (MCGC, por sus siglas en inglés).

Para resolver este complejo sistema de ecuaciones se requiere dividir el espacio ocupado por la atmósfera y el

82 McGuffie, K., Henderson, A., *A Climate Modelling*, op. cit., 2013.

océano en celdillas tridimensionales. En cada una de ellas se asignan valores de las variables que caracterizan su estado (temperatura, velocidad, densidad etcétera) a partir de observaciones directas o indirectas en un determinado instante inicial. Comenzando con estos valores se resuelven las ecuaciones para derivar las evoluciones temporales de dichas variables de estado en cada celdilla de la malla del modelo. Esto se hace calculando iterativamente los valores previstos de tales variables en intervalos temporales discretos (paso temporal), es decir, avanzando en el tiempo hasta llegar al final del periodo de simulación que se desee.

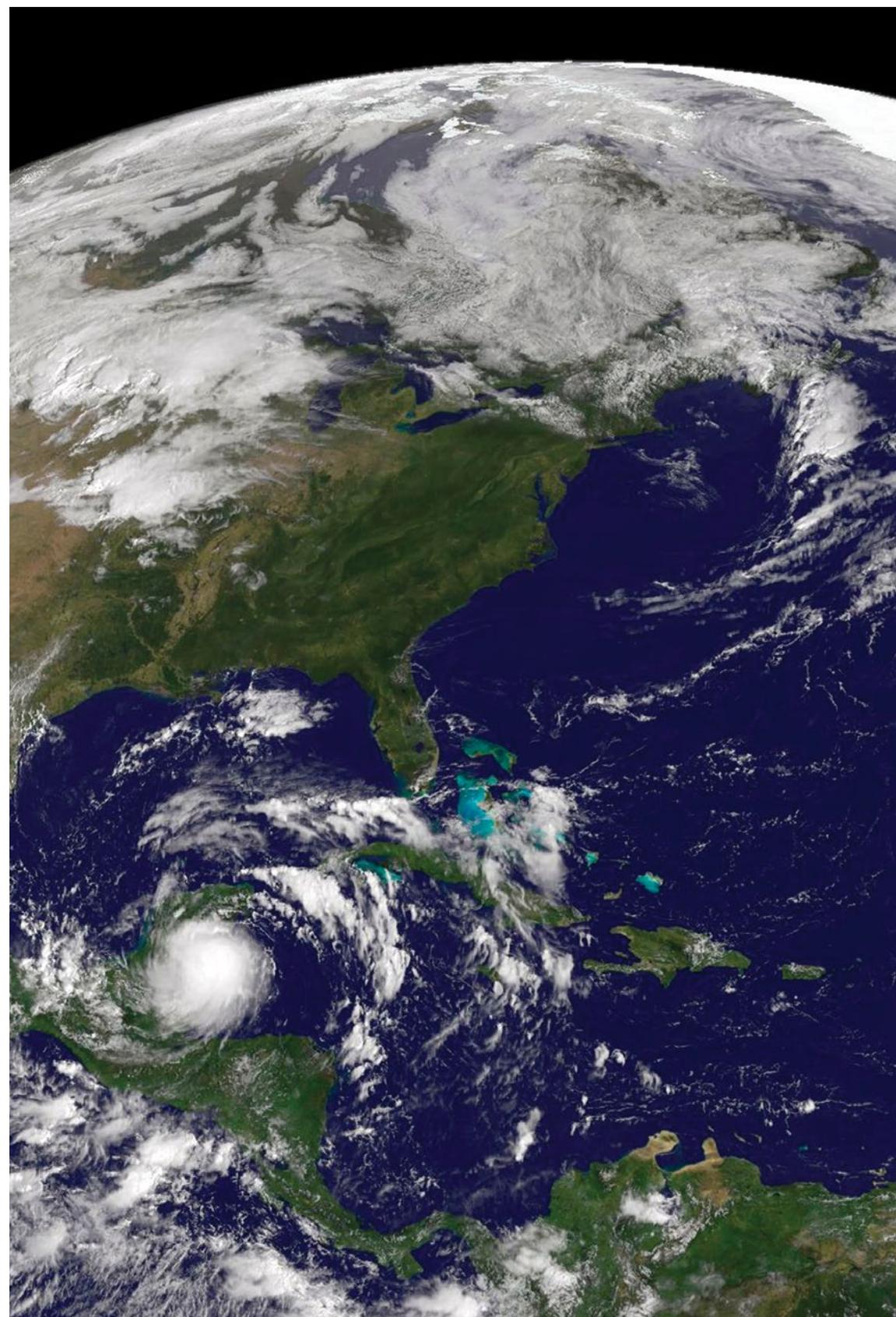
La duración de estos intervalos debe estar en concordancia con el tamaño de las celdillas: cuanto menor sea su tamaño, más corto es el paso temporal y, por tanto, mayor número de iteraciones serían necesarias para completar el periodo de simulación.

La resolución espacial de la parte atmosférica de los MCGC actuales varía entre 2° y 5° de latitud-longitud en la horizontal, y en la vertical se consideran de 10 a 30 capas entre la superficie y el tope superior de la atmósfera, cada una con espesor variable. Esto implica unos pasos temporales de entre 30 y 60 minutos.

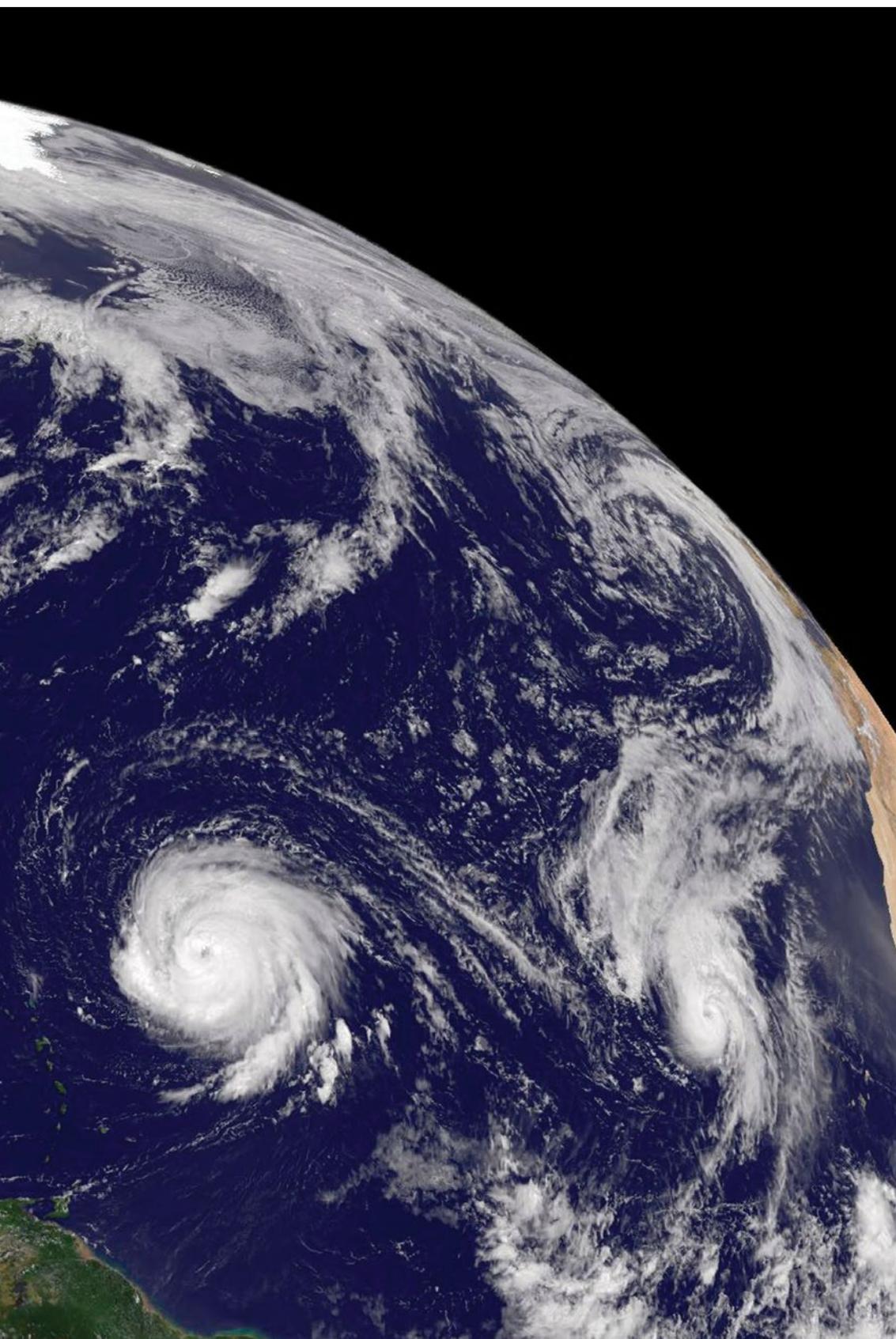
### ECUACIONES QUE INTEGRAN LOS MODELOS

**El movimiento horizontal.** La segunda ley de Newton dice que “la aceleración de una partícula es igual al vector suma de las fuerzas que actúan sobre el cuerpo”. Esto es el principio de la conservación del Momentum. Las principales fuerzas en la atmósfera son la fuerza, que actúa en el aire debido a la presión y la Fuerza de Coriolis. La Fuerza de Coriolis es una aceleración aparente que el aire posee por la rotación del planeta. Si una parcela de aire se mueve entre dos puntos entonces su desplazamiento relativo a la superficie de la Tierra se curvaría y tendería hacia la izquierda en el hemisferio sur y hacia la derecha en el hemisferio norte.

**La ecuación hidrostática.** Es una expresión relacionada a la variación de la presión con la altura. La componente vertical de la Fuerza de Coriolis, en las ecuaciones verticales del movimiento, es muy pequeña comparada con las fuerzas de gran escala como el gradiente de presión y la gravedad que actúan en esta dirección. En muchos de los modelos se asume el equilibrio hidrostático.



La fuerza de Coriolis es una aceleración aparente que el aire posee por la rotación del planeta.



**La ecuación termodinámica.** La primera ley de la Termodinámica puede ser enunciada como la cantidad de calor adicionado al sistema que es exactamente balanceado por el trabajo realizado en incrementar su volumen y el cambio de su energía interna. Ésta es una expresión del principio de la conservación de energía, con la cual el cambio en la energía dentro de un sistema es igual a la transferencia neta de la energía a través de las capas del sistema.

**La ecuación de continuidad.** Es el principio básico de la Conservación de la Masa: el estado de la materia no se crea ni se destruye.

La Ecuación del Estado. Relaciona tres principales variables termodinámicas: presión, densidad y temperatura para un gas perfecto. Sin embargo, un perfecto gas no existe y de los gases reales como la atmósfera podemos asumir que obedecen estas ecuaciones.

**La ecuación de vapor de agua.** Describe el camino en el cual la cantidad de vapor de agua en una particular parcela de aire cambia como resultado de la advección, de condensación o evaporación.

### Aplicaciones

Vivir con la variabilidad del clima y el cambio climático, y adaptarse a ellos, constituye todo un reto cotidiano. Los efectos combinados del cambio climático, el crecimiento de la población, la migración, el desarrollo de infraestructuras y el uso inapropiado del suelo representan desafíos para la sociedad; las poblaciones están expuestas a condiciones peligrosas y a localizaciones donde la vulnerabilidad va en aumento. A pesar de todo, la humanidad debe ser capaz de anticiparse al clima futuro con un razonable grado de confianza a fin de adaptarse satisfactoriamente<sup>83</sup>.

La predicción del clima puede ofrecer a las sociedades, los gobiernos y los sectores más sensibles al clima como el agua, la agricultura y seguridad alimentaria, la salud y la gestión de riesgos, las herramientas que les permitan determinar cuáles son los riesgos y beneficios de las condiciones climáticas esperadas mediante la aplicación de las medidas de urgencia pertinentes. Asimismo, servirá de apoyo en la toma de decisiones de los sectores prioritarios,

<sup>83</sup> OMM, *Guía de prácticas climatológicas*, OMM-No. 100, 3ª ed., Ginebra, 2011.

al reducir los impactos de los desastres climáticos, mejorar la seguridad alimentaria y la salud, y fortalecer la gestión de los recursos hídricos.

### Sector agua

El agua es fundamental en el desarrollo económico y social. Tiene una función básica en el mantenimiento de la integridad del medio ambiente. Los administradores, ya sea del gobierno o del sector privado, tienen que tomar decisiones sobre la asignación del vital recurso cada vez más decreciente, entre una demanda cada vez mayor. Factores como el crecimiento demográfico y el cambio climático afectan en una mayor medida a los recursos hídricos.

La información de la predicción climática puede servir de apoyo para determinar los flujos fluviales a corto plazo y estacionales y la disponibilidad de agua a largo plazo, lo



La agricultura está estrechamente vinculada a las condiciones meteorológicas.

que puede potencialmente permitir a los administradores y usuarios planificar, operar y administrar el uso del agua, informar las decisiones comerciales de la asignación de agua, gestión del flujo ambiental y ayudar al desarrollo de políticas hídricas destinadas a garantizar la seguridad del suministro.

### Sector agrícola y seguridad alimentaria

La agricultura y la seguridad alimentaria están estrechamente vinculadas a las condiciones meteorológicas y climáticas, mediante fenómenos de gravedad extrema, como las sequías y las olas de calor, las crecidas y las tempestades. Los desastres relacionados con el clima pueden provocar malas cosechas, inseguridad alimentaria, destrucción de los principales medios de subsistencia, migraciones de personas en masa y un crecimiento económico nacional negativo.

El uso de la información de la predicción climática puede aumentar los resultados y/o ayudar a mitigar el impacto de los eventos desfavorables al brindar la oportunidad de tomar decisiones sobre cultivos específicos, las fechas de siembra y cosecha, la aplicación de fertilizantes y el manejo de plagas y enfermedades. A largo plazo puede elevar los ingresos promedio superiores a los niveles de línea de base con la toma de mejores decisiones. Los agricultores también pueden experimentar los beneficios no monetarios, incluyendo la reducción del tiempo de planificación, la reducción de la carga de trabajo, o mejora de la nutrición.

### Sector salud

El tiempo y el clima están inextricablemente vinculados a algunos factores determinantes de la salud: el aire, el agua, los alimentos, la vivienda y la enfermedad. Cada año las olas de calor y frío, los ciclones tropicales, las crecidas y las sequías cobran muchas vidas por los efectos indirectos de fenómenos meteorológicos y climáticos extremos y su relación con enfermedades infecciosas, contraídas por el agua y transmitidas por vectores como el paludismo, el virus del Nilo occidental y el dengue. O bien, se aumente el riesgo de enfermedades como el cólera y la leptospirosis, en razón de temperaturas más cálidas que pueden modificar la tasa de supervivencia de los patógenos, y de una mayor cantidad de lluvias e inundaciones que movilizan contaminantes.

El calor excesivo, debido a olas de calor, contribuye a la deshidratación, agrava las afecciones pulmonares y car-

díacas crónicas, que unidas a la contaminación atmosférica, puede provocar insolación, golpes de calor e incluso la muerte. El clima es el principal factor determinante del tipo de polen en el aire y la época en que aparece, que es una de las principales causas de alergia transmitida por vía aérea y el asma. Las tormentas de arena y polvo causan problemas respiratorios y cardiovasculares y, en África, se asocian a la meningitis. Entender la relación que existe entre el clima y la salud es fundamental para adoptar medidas de protección frente a los riesgos que plantea el clima para la salud.

Es por ello que mediante el uso de predicciones climáticas se pueden crear mecanismos e intervenciones para potenciar la capacidad de adaptación de los sistemas de salud a los riesgos climáticos y obtener beneficios para la salud con la mitigación de tales riesgos. Asimismo, se pueden alimentar los sistemas de detección de los brotes de paludismo, meningitis, fiebre del dengue y enfermedades relacionadas con el clima con mucha antelación.

### Sector reducción de riesgos

Vivimos tiempos tempestuosos. En el periodo de 1992–2001, los desastres relacionados con el tiempo y el clima causaron la muerte de 622,000 personas, aproximadamente, afectando a más de dos mil millones por la pérdida de su hogar, de tierras de cultivo y la propagación de enfermedades. Estos episodios son cada vez más frecuentes y estudios sugieren que el número de desastres relacionados con el tiempo se ha triplicado en los últimos 30 años<sup>84</sup>.

La reducción del riesgo de desastres constituye el eje central de la misión de la Organización Meteorológica Mundial y de los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales (SMHN), ya que más de 90% de los desastres están vinculados a peligros relacionados con el tiempo, el clima y el agua.

Las predicciones climáticas apoyan la gestión de los riesgos y las oportunidades relacionadas, entre otras cosas, con las reservas de agua y la seguridad alimentaria. Asimismo, proporcionan los elementos de apoyo necesario para tomar decisiones acerca del manejo y planificación de las actividades sensibles al clima para hacer frente a posibles desastres naturales.

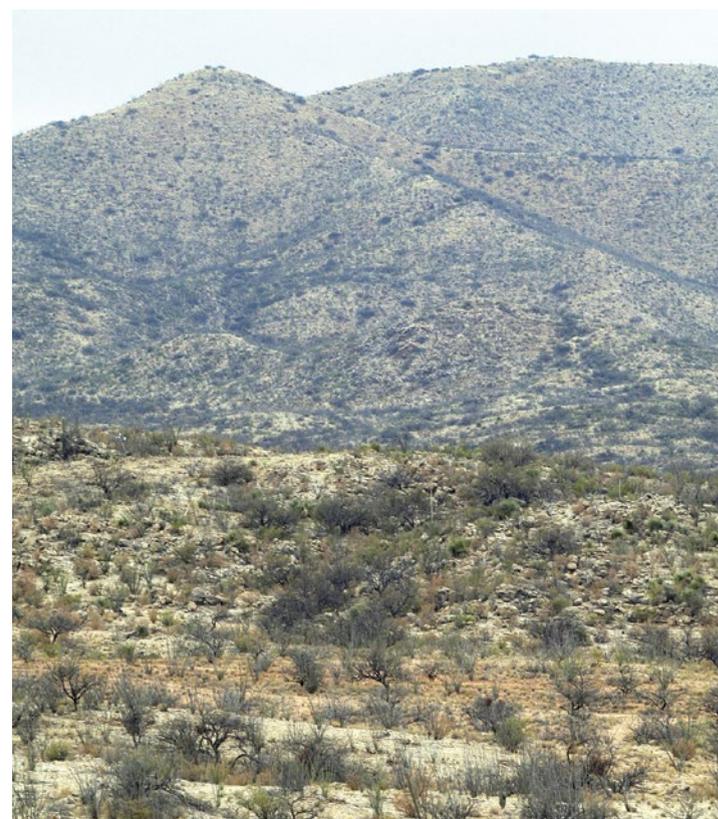
84 OMM, *Guía de prácticas climatológicas*, op. cit., 2011.

### CALENTAMIENTO GLOBAL Y ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

El calentamiento global es el aumento gradual de la temperatura de la Tierra. De acuerdo al V Informe del IPCC “es inequívoco y desde la década de 1950, muchos de los cambios observados no han tenido precedentes en los últimos decenios a milenios”. La atmósfera y el océano se han calentado, los volúmenes de nieve y hielo han disminuido, el nivel del mar se ha elevado y las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) han aumentado<sup>85</sup>.

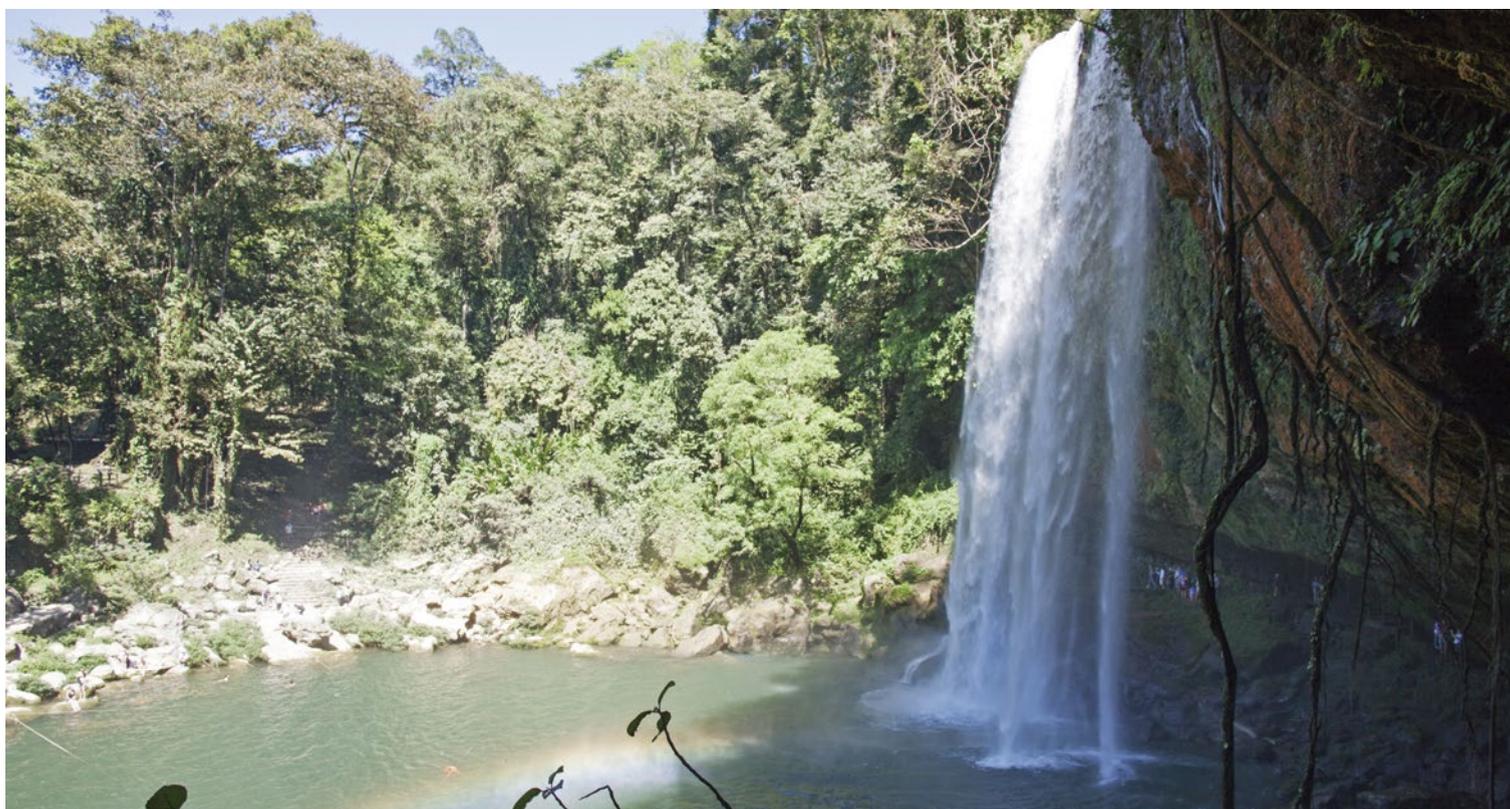
El calentamiento global se refiere al aumento de la temperatura promedio terrestre, y el cambio climático está relacionado con las variaciones significativas de largo plazo en los patrones normales del clima.

La Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) define el cambio climático como “un cambio en el clima que es atribuible directa o indirecta-



El calentamiento global es el aumento de la temperatura de la Tierra. Desierto de Sonora.

85 Stocker, T., Qin, D., Plattner, G., Tignor, M., Allen, S., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., and Midgley, 2013: Cambio Climático 2013 Bases Físicas. *Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Resumen para responsables de políticas. Disponible en: <http://www.climatechange2013.org/>



El clima cambia a escalas diferentes.

mente a las actividades humanas, que altera la composición de la atmósfera planetaria y que se observa en periodos de tiempo comparables, en forma adicional a la variabilidad climática natural”. Por su parte, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático, lo define como “cualquier cambio en el clima producido durante el transcurso del tiempo, ya sea debido a la variabilidad natural o a la actividad humana”.

El calentamiento global observado en décadas recientes hace evidente que un cambio climático está ocurriendo, y sus causas han sido atribuidas a las actividades humanas, en particular al incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero<sup>86</sup>. Entender las variaciones locales en el clima y la forma y magnitud de los impactos del calentamiento global, y el cambio climático asociado, son pasos imprescindibles para la seguridad del género humano.

### Evidencia del cambio climático

La evidencia del cambio climático ha sido documentada en varias componentes del sistema climático, como la at-

<sup>86</sup> IPCC, *Cambio climático 2007, op. cit.*, 2007.

mósfera, el océano, los continentes y la cubierta de hielo y nieve<sup>87</sup>. Sin embargo, una de las evidencias más claras ha sido analizado a partir de los datos instrumentales del clima, específicamente de las observaciones de temperatura. La compilación y análisis del registro global de temperatura han requerido de la cuidadosa recolección y procesamiento científico de datos termométricos en puntos de observación representativos de todo el planeta.

La construcción de series climáticas para la escala de un hemisferio o de todo el globo es una tarea científica compleja, ya que implica el manejo adecuado de las incertidumbres asociadas a las mediciones instrumentales y la correcta agregación de las series de estaciones individuales en la serie del área a representar<sup>88</sup>.

La detección del calentamiento global sólo es posible efectuarla en grandes áreas geográficas como la de un hemisferio o un continente, de manera que la señal climática de gran escala no se vea enrarecida por los efectos asociados

<sup>87</sup> IPCC, *Cambio climático 2007, op. cit.*, 2007.

<sup>88</sup> Jones, P. D., Briffa, K. R., *Global surface air temperature variations during the twentieth century: Part 1, spatial, temporal and seasonal details, The Holocene* 1992, pp. 165-179.



Incluso en un clima sin cambios hay un cierto número de eventos extremos.

a la configuración fisiográfica local. El análisis de las variaciones climáticas en escalas espaciales pequeñas (por ejemplo en la escala de una entidad federativa) implica un mayor nivel de detalle en las observaciones, las cuales darán cuenta de procesos locales. Así, la señal de cambio del clima en una localidad particular puede diferir de la señal planetaria y el comportamiento observado en una localidad no necesariamente será idéntico al del promedio de toda la Tierra. De ahí la importancia de analizar los datos climáticos locales con el fin de comprender el posible impacto del calentamiento planetario en regiones específicas.

### Cambios en los extremos del clima

Dada la fuerte interdependencia entre el clima y las actividades humanas, cualquier cambio climático tendrá diversas implicaciones para la economía y la sociedad. Una de las mayores consecuencias es quizás, el aumento en la frecuencia de eventos meteorológicos extremos, anunciado por la Organización Meteorológica Mundial a principios de esta década (2010). Los cambios en la frecuencia de eventos me-

teorológicos extremos han empezado a ser demostrados en la literatura científica por algunos investigadores, incluyendo un panorama de éstos para el planeta en su conjunto<sup>89</sup> y para diversas regiones incluyendo Norteamérica<sup>90</sup> y Centroamérica. Para la República Mexicana algunos estudios han sido realizados como parte de los Programas Estatales de Acción ante el Cambio Climático, pero se necesita mayor investigación para tener diagnósticos en cada entidad federativa.

Los eventos extremos son ocasionados por una extensa combinación de factores, aunque también ocurren como parte del clima normal, es decir, incluso en un clima sin cambios en su variabilidad hay un cierto número de eventos extremos. Es por ello que la atribución directa al cambio climático de un evento extremo en particular es muy difícil de determinar. La detección de los cambios en los extremos y el monitoreo de éstos es un tema rele-

89 Trenberth, K. E., Jones, P. D., Ambenje, P. R., entre otros, "Observations: Surface and Atmospheric Climate Change", en: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, Cambridge, UK y Nueva York, EUA, 2007.

90 Peterson, T. C., Manton, M. J., *Monitoring changes in climate extremes: a tale of international collaboration*, Bull. Amer. Meteorol. Soc. 89, 2008, pp. 1266-1271.



El SMN tiene una amplia documentación del aumento de temperatura del país.

vante tanto en un clima normal como en condiciones de cambio climático.

A diferencia de los extremos climáticos, que ocurren en periodos de tiempo relativamente largos como en las sequías, la mayoría de los eventos meteorológicos extremos ocurren en la escala de unos cuantos días y están asociados a sistemas atmosféricos en su mayoría regionales. La detección de cambios en los extremos meteorológicos desde un punto de vista climatológico requiere de observaciones en la escala temporal diaria.

No existe una definición única para los eventos extremos, pero puede decirse que son los eventos registrados en el comportamiento de una variable dada, que tienen baja probabilidad de ocurrencia y cuyo valor observado en dicha variable excede un umbral especificado. Diversos grupos de investigación han propuesto diferentes definiciones para los eventos extremos. Por ejemplo, para la identificación de extremos de precipitación calculados a partir de datos diarios, los investigadores Nicholls y Murray sugieren al menos tres

índices: a) la frecuencia de días que exceden los percentiles 90, 95 y 99, calculando los percentiles únicamente con los días con lluvia; b) el índice simple de intensidad de lluvia, calculado dividiendo la lluvia total por el número de días con lluvia y c) el porcentaje de la lluvia en un periodo (año, estación, etcétera) que ocurre en los días con lluvia por arriba de los percentiles 90, 95 y 99. No obstante que muchas definiciones de evento extremo son posibles, el uso de una base teórica común para definir los eventos extremos permite su estudio sistemático.

Por lo tanto, el Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI por sus siglas en inglés) coordinado por la Comisión de Climatología de la Organización Meteorológica Mundial (CCI/OMM), el proyecto sobre Predecibilidad y Variabilidad Climática (CLIVAR), y la Comisión Técnica de Oceanografía y Meteorología Marítima (JCOMM), ha formulado 27 índices para detectar las modificaciones en el comportamiento de los extremos del clima. Este conjunto de índices permite que su cálculo sea realizado de la misma manera internacionalmente, a fin de integrar los índices de diferentes regiones.

Es requisito para el cálculo de los índices de cambio climático que las observaciones del clima a partir de las cuales se calculen los índices sean las mejores posibles. Esto implica que los datos diarios hayan sido sujetos a un estricto control de calidad y análisis de homogeneidad, aspectos de gran importancia en los datos instrumentales del clima para el estudio del cambio climático.

### Detección de cambio climático en México

En México, las observaciones instrumentales del clima se encuentran disponibles en varias bases de datos, en la mayoría de ellas aún se requiere implementar un estricto proceso de control de calidad. El SMN tiene la misión de administrar la base de datos nacional oficial del clima en México y es de carácter público. Específicamente, los datos de la red de estaciones climatológicas convencionales administrados en el sistema CLIMA COMputarizado (CLICOM) son la fuente de información climática con las dos características requeridas para el estudio del clima en la escala de las entidades federativas: un periodo de registro largo (por lo menos cuatro o cinco décadas continuas) y cobertura geográfica suficientemente densa. Otras redes de observación con diferente cobertura geográfica, número de estaciones y propósito específico son los observatorios sinópticos, la red de radiosondeo,

las estaciones meteorológicas automáticas, y las redes de observación de otras instituciones. Estas observaciones son valiosas para el pronóstico del estado del tiempo o para la toma de decisiones en tiempo real, pero para el propósito de analizar el clima regional pueden tener la desventaja de un periodo de registro relativamente corto, o baja resolución en su cobertura geográfica, con lo que sólo satisfacen en parte los requisitos para el estudio del clima con un alto nivel de detalle. La consolidación de las bases de datos climáticas en México aún requiere la aplicación de procedimientos de control de calidad, análisis de homogeneidad por especialistas del clima y la implementación de metadatos.

Los avances tecnológicos en instrumentación meteorológica y medios de comunicación han facilitado en años recientes el uso de estaciones meteorológicas automáticas. Sin embargo, antes de implementar nuevas redes de observación debe tomarse en cuenta que en el estudio del cambio climático, la relevancia de los datos instrumentales se centra en la longitud de la serie de tiempo, el grado de homogeneidad de los registros existentes y el manejo adecuado de la incertidumbre inherente al proceso de medición<sup>91</sup>. Por lo tanto, conservar los puntos de medición con registros más antiguos y asegurar su continuidad reviste gran importancia.

Un análisis preliminar de los datos instrumentales de temperatura de la República Mexicana permite documentar un claro aumento de la temperatura promedio del país en los años recientes, el cual es consistente con el calentamiento global. Esta evidencia basada en los promedios de temperatura calculados por el Servicio Meteorológico Nacional a partir de observaciones instrumentales nos muestra que el clima mexicano se encuentra inmerso de manera consistente en los procesos de cambio climático identificados por la comunidad científica mundial y al mismo tiempo nos plantea el reto de incrementar nuestro entendimiento detallado sobre los cambios del clima en escalas más pequeñas (regiones, entidades federativas, localidades), ya que en éstas tienen lugar la mayor parte de las decisiones que impactan directamente la dinámica socioeconómica del país. Al respecto, la Guía para la elaboración de Programas Estatales de Acción ante el Cambio Climático, coordinada por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

<sup>91</sup> Peterson, T. C., Zhang, X., Brunet-India, M., Vazquez-Aguirre, J. L., *Changes in North American extremes derived from daily weather data*, Journal of Geophysical Research, 2008, doi:10.1029/2007JD009453.



La precipitación ha tenido un ligero incremento en algunas regiones de México.

(INECC), la Universidad Veracruzana y el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México, menciona con referencia a los estudios de cambio climático para las entidades federativas que: “...un estado, por su tamaño y su ubicación intermedia en los niveles de gobierno, hace más factible implementar medidas para mitigar la emisión de gases de efecto invernadero así como políticas exitosas para adaptarse al cambio climático”.

### Escenarios de cambio climático

En México se desarrollan escenarios climáticos regionales en: el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California; el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y el Centro de Ciencias de la Atmósfera en coordinación con el INECC, financiado por el fondo del

Medio Ambiente Mundial (GEF, por sus siglas en inglés) y administrado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), llevaron a cabo el estudio Actualización de Escenarios de Cambio Climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático. Estudio que realizó un análisis regional del periodo histórico y de las proyecciones de 15 modelos de circulación global a futuro cercano (2015-2039) y futuro lejano (2075-2099) para el caso de México, que serán utilizados en el V Reporte de Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC).

En el periodo 1901-2009 la temperatura superficial media de México tuvo un incremento medio de menos de 2°C. Algunas regiones del noroeste han experimentado incrementos mayores que la media nacional, y otras zonas del noreste, muestran una tendencia de enfriamiento. Estas tendencias corresponden a variabilidad natural, a procesos de contaminación regional por aerosoles, a cambios en el uso de suelo e incremento de concentración de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Es probable que el enfriamiento regional termine y el calentamiento se dé en forma acelerada en esta parte del planeta.

La precipitación muestra una tendencia que se incrementa ligeramente. Algunas regiones han experimentado aumentos mayores que la media nacional (región Centro-Sur), mientras otras presentan ligeros decrementos (partes de Hidalgo y Veracruz). La amplitud de la variabilidad natural es mucho mayor que esta tendencia y por tanto, las sequías

siguen siendo tan intensas como en el pasado, así como los episodios de lluvias por encima de la media.

Los escenarios de cambio climático por efecto del forzamiento radiativo, como los presentados por el IPCC AR 4 (2007) o el ensamble preparado con seis realizaciones del modelo de clima regional del Simulador de la Tierra sugieren que el incremento en la temperatura continuará, con un aumento de 2 a 4°C hacia finales del siglo XXI, principalmente hacia el norte del país. Estos resultados son consistentes con los presentados en la Tercera y Cuarta Comunicaciones Nacionales, así como con otros estudios más recientes.

En el caso de la precipitación, la mayoría de los modelos IPCC AR 4 (2007) sugieren una disminución en la tendencia de las lluvias por efectos del calentamiento global. Esto es contrario a lo observado en el último siglo. Aunque los modelos climáticos de última generación muestran mejoras en las simulaciones regionales del ciclo hidrológico, aún requieren incorporar herramientas para simular efectos de mesoescala determinantes para el clima, como lo son los ciclones tropicales en el Golfo de México y Mar Caribe.

En general, para la precipitación y también en cierta medida para la temperatura, las estaciones secas parecen ser más sensibles a las emisiones de GEI que las estaciones húmedas, razón por la que interpretar los escenarios de cambios en la precipitación para México a escala regional requiere de un conocimiento más profundo sobre los factores dinámicos que la determinan. ❄️

# APÉNDICE

## FUNDACIÓN DEL OBSERVATORIO METEOROLÓGICO CENTRAL MINISTERIO DE FOMENTO

### SECCION 1ª

Siendo uno de los fines de las Comisiones Exploradoras del Territorio Nacional el dar á conocer á este bajo todos los aspectos, á fin de promover entre otros beneficios el de la inmigracion extranjera, el C. General en Jefe del Ejército Nacional Constitucionalista, Encargado del Supremo Poder Ejecutivo, ha acordado que la Iª Comision Exploradora de que es vd. jefe, se encargue del estudio de la Climatología del país, á cuyo efecto tomará bajo su cuidado el Observatorio Meteorológico, que por acuerdo del C. General 2º en jefe del Ejército Nacional Constitucionalista se encuentra en construccion en el Palacio Nacional, tomado vd. La direccion de dicha oficina. Asimismo, la Iª Comision Exploradora propondrá á este Ministerio de los medios conducentes al establecimiento de la red meteorológica nacional, y entablara las correspondientes relaciones con los Observatorios, Corporaciones Científicas y Profesores del extranjero, á fin de que adquiriendo sus trabajos la mayor publicidad posible, lleguen á conocimiento de las personas y empresas que estén en aptitud de utilizarlos. Siendo, además, uno de los resultados prácticos del estudio climatológico el conocimiento de los productos vegetales, la Iª Comision Exploradora se ocupará de la formacion de Calendarios Botánicos de las diversas regiones de la República, relacionando los varios fenómenos de la vida vegetal, con los cambios atmosféricos, á efecto de perfeccionar la Geografía Botánica Mexicana, base indispensable para el buen éxito de muchas operaciones, así agrícolas como fiscales y económicas.

Será tambien asunto encomendado á la Iª Comision Exploradora el estudio de los fenómenos físicos accidentales que puedan presentarse, á cuyo efecto los miembros de la Comision harán excursiones á los lugares en donde sea necesaria su presencia cada vez que así lo exija la naturaleza de su empleo.

Procederá vd., pues, á organizar todos los trabajos mencionados, á la mayor brevedad posible.

Libertad en la Constitucion. México, Febrero 17 de 1877.

Riva Palacio.

Sr. D. MARIANO BARCENA, Jefe de la Comisión Exploradora del Territorio Nacional.  
Director del Observatorio Meteorológico Central.

PRESENTE.

La Iª Comisión Exploradora a que se refiere la comunicación anterior, y que fundó el Observatorio Meteorológico Central, se compone de los ingenieros Mariano Bárcena, Vicente Reyes, Miguel Perez, José Zendejas y José Collazo. Comenzó sus trabajos el día 6 de Marzo de 1877. México.- Diaz de León, impresor.

La paleografía es autoría de quien escribió este decreto, es literal y respeta la ortografía del documento. Este documento se tiene en la pared de una sala de juntas del Servicio Meteorológico Nacional.

# FUENTES BIBLIOGRÁFICAS, HEMEROGRÁFICAS, REFERENCIAS WEB, CRÉDITOS FOTOGRÁFICOS Y SIGLAS Y ACRÓNIMOS

## BIBLIOGRAFÍA Y HEMEROGRAFÍA

Ahrens, C. D., *Essentials of Meteorology: An Invitation to the Atmosphere*, 7ª ed., Belmont, CA, 2012, Brooks/Cole, 506 pp.

Ahrens, C. D., *Meteorology today: An introduction to weather, climate, and the environment*, 9ª ed., Belmont, CA, 2009, Brooks/Cole.

Alfonso, A. P., *Climatología de las tormentas locales severas de Cuba. Cronología*, La Habana, Editorial Academia, 1994, 168 pp.

Aristóteles, *Acerca del cielo. Meteorológicos*, Madrid, Biblioteca Clásica Gredos, 1996, 432 pp.

Arntz, W., Tarazona, J., "Effects of El Niño on benthos, fish and fisheries off the South American Pacific coast", en Glynn, P. W. (ed.), *Global ecological consequences of the 1982-83 El Niño southern oscillation*, Oceanography Series 52, Elsevier, Amsterdam, 1990.

Ashok, K., Behera, S. K., Rao, S. A., Weng, H., Yamagata, T., *El Niño Modoki and its possible teleconnection*, J. Geophys. Res., 2007.

Baede, A. (ed), Van der Linden, P., Verbruggen, A. (Co-ed), "Anexo II Glosario de Términos", *Informe de Síntesis del Cuarto Informe*, IPCC, 2007.

Barnston, A. C., Chelliah, M., Stanley G. B., *Documentation of a Highly ENSO – Related SST Region in the Equatorial Pacific*, Atmosphere, Ocean, 1997.

Barnston G. A., Kumar A., Goddard L., Hoerling P. M., *Improving Seasonal Prediction Practices Through Attribution of Climate Variability*, American Meteorological Society, 2005.

Batigne, Stéphane, *Para comprender el clima y el medio ambiente*, Bogotá, Panamericana Editorial, 2006, 128 pp.

Biondi, F., Gershunov A., Cayan, D. R., *North Pacific decadal climate variability since 1661*, J. Climate, no. 14, 2001.

Bond, N. A., Harrison, D. E., *The Pacific Decadal Oscillation, air-sea interaction and central north Pacific winter atmospheric regimes*, Geophys. Res. Lett., 2000.

Bove, M. C., Elsner, J. B., Landsea, C. W., Niu, X., O'Brien, J. J., *Effect of El Niño on U. S. landfalling hurricanes*, EUA, Bull. Amer. Meteor. Soc., 1998.

Bravo Lujano, C., *Características de la temporada de ciclones tropicales del año 1999 en México y demás países de América del Norte, Centroamérica y el Caribe*, México, Revista Geográfica No. 130, Instituto Panamericano de Geografía e Historia, julio-diciembre 2001.

Bravo, C., Hernández, A., Medina, A. M., Espinosa, C., *Resumen de la actividad de ciclones tropicales en 1998 y pronóstico para 1999*, México, Prevención No. 22, Órgano Informativo del Sistema Nacional de Protección Civil, Centro Nacional de Prevención de Desastres, Secretaría de Gobernación, febrero-mayo, 1999, pp. 38-43.

Buckley, Bruce, Hopki, Edward J., *Meteorología*, Colec. Biblioteca Visual, Barcelona, Timun Mas, 2005.

Camargo, S. J., Barnston, A. G., Klotzbach, P. J., Landsea, C. W., *Seasonal tropical cyclone forecasts*, WMO Bull 56, 2007.

Camargo, S. J., Emanuel, K. A., Sobel, A. H., *Use of a genesis potential index to diagnose ENSO effects on tropical cyclone genesis*, Journal of Climate, 20, 2007.

Castro, C. L., McKee, T. B., Pielke, R. A., *The Relationship of the North American Monsoon to Tropical and North Pacific Sea Surface Temperatures as Revealed by Observational Analyses*, EUA, J. Climate, no. 14, 2001.

- Cavazos T., *Large-Scale Circulation Anomalies Conductive to Extreme Precipitation Events and Derivation of Daily Rainfall in Northeastern Mexico and Southeastern Texas*, Journal of Climate, Vol. 12, 1998.
- Cavazos, T., Turrent, C., Lettenmaier, D. P., *Extreme precipitation trends associated with tropical cyclones in the core of the North American monsoon*, EUA, GRL, Vol. 35, 2008.
- Cayan, D. R., Dettinger, M. D., Díaz, H. F., Graham, N. E., *Decadal variability of precipitation over western North America*, J. Climate, no. 11, 1998.
- Chan, J. C. L., *Tropical cyclone activity in the northwest Pacific in relation to El Niño/Southern Oscillation phenomenon*, Mon. Wea. Rev., 113, 1985.
- Chylek, P., Lesins, G., *Multidecadal variability of Atlantic hurricane activity: 1851-2007*, EUA, J. Geophys Res, 113, 2008.
- Comisión Nacional del Agua, *Servicio Meteorológico Nacional: 135 años de historia en México*, 1ª ed., México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012.
- Conaculta-Editorial Raíces, *Arqueología Mexicana*, núm. 96, México, Revista bimestral: marzo-abril, 2009.
- Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, "Huracanes", *Información Científica y Tecnológica*, No. 37, México, 1981, pp. 2-12.
- Cortés Toharia, C., *Tiempo y clima. Predecir el tiempo: Tarea difícil, tarea importante*, tomo 14, Madrid, Príncipe de Vergara, 1985.
- Cuadrat, J., Pita, F., *Climatología*, 2ª ed., Madrid, Cátedra, 2000.
- David, K. A., Comrie, A. C., *The North American Monsoon*, EUA, Bull. Amer. Meteor. Soc., 78, 1997.
- Díaz, H. F., George, N. K., *Global Climatic Anomalies Associated with Extremes in the Southern Oscillation*, Journal of Climate, 1989.
- Dijkstra, H. A. *The ENSO phenomenon: theory and mechanisms*, Adv. Geosci., 2006.
- Emanuel, K. A. *Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years*, EUA, Nature, 436, 2005.
- Escobar, O. A., "Desastres Agrícolas en México", *Catálogo Histórico*, tomo 11, Siglo XIX (1822-1900), FCE / CIESAS, 2004.
- Estoque M. A., Luque, J., Chandek-Monteza, M., García, J., *Efects of El Niño on Panama rainfall*, Geofísica Internacional, 24, 1985.
- Farfan, L. M., Alfaro, E., Cavazos, T., *Characteristics of tropical cyclones making landfall on the Pacific coast of Mexico: 1970-2010*, Atmósfera 26, 2013.
- Feldstein, S.B., *Fundamental mechanisms of PNA growth and decay*, Q. J. R. Meteorol. Soc., 2002.
- Feldstein S. B., *The time-scale, power spectra, and climate noise properties of teleconnection patterns*, J. Climate, 2000.
- Frank, W. M., Young, G. S., *The interannual variability of tropical cyclones*, Mon Weather Rev, 135, 2007.
- Franzke, C., Feldstein S. B., *The continuum and dynamics of Northern Hemisphere teleconnection patterns*, J. Atmos. Sci., 2005.
- García-Oliva, F., Ezcurra E., Galicia, L., *Pattern of rainfall distribution in the Central Pacific coast of Mexico*, Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography, vol. 73, No. 3/4, 1991.
- Gebbie, G., Eisenman, I., Wittenberg, A. T., Tziperman, E., *Modulation of westerly wind bursts by sea surface temperature: A semi-stochastic feedback for ENSO*, J. Atmos. Sci., 2007.
- Gershunov, A., Barnett, Tim P., *Interdecadal Modulation of ENSO Teleconnections*, Bull. Amer. Meteor. Soc., 1998.
- Gill, A. E., *Some simple solutions for heat-induced tropical circulation*, Quarterly Journal of Royal Meteorological Society, 1980.
- González, J., Ramírez, A., Cornejo, E., Zárate, A., Cavazos, T., *Teleconexiones de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) a la precipitación y temperatura en México*, 2009.
- Gray, W. M., *Atlantic Seasonal Hurricane Frequency. Part I: El Niño and 30 mb Quasi-Biennial Oscillation Influences*, Mon. Wea. Rev., 112, 1984.
- Grimm, A. M, Simone, E. T., Gomes, J., *Precipitation Anomalies in Southern Brazil Associated with El Niño and La Niña Events*, EUA, Journal of Climate, 1998.
- Guillén-Cadena, M.J., *Descripción del modelo acoplado The Climate Forecast System version 2 (CFSv2) para la predicción estacional del clima en México*, Universidad Veracruzana, Xalapa, 2015.
- Hartmann, D.,L. *Global Physical Climatology. USA, International Geophysics Series*, vol. 56, Academic Press, 1994.
- Holmgren M., Scheffer, M., Ezcurra E., *El Niño effects on the dynamics of terrestrial ecosystems*, EUA, Trends in Ecology and Evolution, 2001.
- Holton, J. R., *Meteorology*, Academic Press Dictionary of Science and Technology, 1992.
- IDEAM, *Manual del observador meteorológico*, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Medellín, 2001.
- IPCC, *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*, Equipo de redacción principal: Pachauri, R. K. y Reisinger, A., Ginebra, Suiza, 2007.
- Jáuregui E., Luyando E., Casasola M., *13th Symposium on Global Change and Climate Variations. Variability of severe winters in the Mexico basin during the XXth century*, Ciudad de México, 2002, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Jin, F. F., *An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO. Part I: Conceptual model*, EUA, J. Atmos. Sci., 1997.
- Jones, P. D., Briffa, K. R., *Global surface air temperature variations during the twentieth century: Part 1, spatial, temporal and seasonal details*, The Holocene, 1992.
- Jones, P. D., Moberg, A., *Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2001*, J. Climate, 2003.
- Kessler, W. S., *Is ENSO a cycle or a series of events?*, EUA, Geophy. Res. Lett., 2003.
- Kim, H. M., Webster, P. J., Curry, J. A., *Impact of shifting patterns of Pacific Ocean warming events on North Atlantic tropical cyclones*, Science, 325, 2009.
- Köpfer, W., Geiger, R. *Klimate der Erde, Gotha: Verlag Justus Perthes*, Wall-map 150 cm x 200 cm, 1928.
- Kousky, V. E., Higgins, R. W., *An alert classification system for monitoring and assessing the ENSO cycle*, Weather Forecasting, 2007.

- Kug, J. S., Jin F. F., and An, S. I., *Two-types of El Niño events: Cold Tongue El Niño and Warm Pool El Niño*, EUA, Journal of Climate, 2009.
- Lau, K. M., *Elements of a stochastic-dynamical theory of the long-term variability of the El Niño-Southern Oscillation*, J. Atmos. Sci., 1985.
- Ledesma, M., Baleriola, G., *Meteorología aplicada a la aviación*, Madrid, Paraninfo, 1968.
- Lindzen, R. S., Nigam S., *On the role of sea surface temperature gradients in forcing low-level winds and convergence in the Tropics*, J. Atmos. Sci., 1987.
- Macías, J. M., *Descubriendo tornados en México. El caso del tornado de Tzintzuntzan*, México, CIESAS, 2001.
- Magaña, V. O., Vázquez, J. L., Pérez, J. L., Pérez, J. B., *Impact of El Niño on precipitation in Mexico*, Geofísica Internacional, 2003.
- Manual del meteorólogo observador, *Servicio a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano (SENEAM)*, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2004.
- Martínez-Sánchez, J. N., Cavazos, T., *Eastern Tropical Pacific hurricane variability and landfalls on Mexican coasts*, Climate Research, 2014.
- McGuffie, K., Henderson, A., *A Climate Modelling, Primer*. Sydney: sellers, 2013.
- McPhaden, M. J., *Genesis and evolution of the 1997-1998 El Niño*, Science, 1999.
- McPhaden, M. J., Busalacchi, A. J., Cheney, R., y otros, *The Tropical Ocean-Global Atmosphere (textsto) observing system: A decade of progress*. Journal of Geophysical Research, 1998.
- Medina, M., *Introducción a la Meteorología*, Madrid, Paraninfo, 1980.
- Mendez M., Magaña V, *Regional Aspects of Prolonged Meteorological Droughts over Mexico and Central America*, Journal of climate, vol. 23, 2010.
- Mendez, Jorge, Ramírez Leyva, Ángela, Cornejo, Eladio, Zárate, Alejandro, Cavazos, Tereza, *Geografía Física Teleconexiones de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) a la Precipitación y Temperatura en México*, México, no. 73, Invest. Geog., 2010.
- Mendoza, B., Jáuregui, E., Díaz-Sandoval, R., *Historical droughts in central Mexico and their relation with El Niño*, Journal of Applied Meteorology 44, 2005.
- Miranda, F., E. Hernández X., *Los tipos de vegetación de México y su clasificación*. México, 1963, Sociedad Botánica de México.
- Montané M. J. C., *Diccionario para la lectura de Textos Coloniales en México*, México, Cuadernos del Archivo Histórico, Publicación de la Dirección General de Documentación y Archivo, Núm. 9, 1998.
- Naujokat, B., *An update of the observed Quasi-Biennial Oscillation of stratospheric winds over the tropics*, Journal of the Atmospheric Sciences, vol. 43, 1986.
- Nicholls, N., "ENSO, drought and flooding rain in Southeast Asia" en *South-east Asia's environmental future. The search for sustainability*, Oxford Univ. Press, 1993.
- OMM, *Guía de prácticas climatológicas*, OMM-No. 100, 3ª ed., Ginebra, 2011.
- Organización Meteorológica Mundial, *Compendio de Apuntes para la Formación del Personal Meteorológico de la Clase III*, Vol. 2, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Dirección General del Servicio Meteorológico Nacional, Departamento de Sistematización de Datos, 1979.
- Organización Meteorológica Mundial, *Compendio de Apuntes para la Formación del Personal Meteorológico de la Clase IV*, Vol. 3, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Dirección General del Servicio Meteorológico Nacional, Departamento de Sistematización de Datos, 1976.
- Pavia, E. G., Graef F., Reyes, J., *PDO-ENSO Effects in the Climate of Mexico*, EUA, Journal of Climate, 2006.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., McMahon, T. A., *Updated worl map of the Köppen-Geiger climate Classification*. USA, Hydrol. Earth Syst. Sci., Vol 11, 2007.
- Penland, C., Magorian, T., *Prediction of Niño 3 sea-surface temperatures using linear inverse modeling*, Journal of Climate, 1993.
- Penland, C., Sardeshmukh, P., *The optimal growth of the tropical sea surface temperature anomalies*, EUA, Journal of Climate, 1995.
- Peterson, T. C., M. J., Manton, *Monitoring changes in climate extremes: a tale of international collaboration*, Bull. Amer. Meteorol. Soc., 89, 2008.
- Peterson, T. C., Easterling, D. R., Karl, T. R., Groisman, P., Nicholls, N., Plummer, N., Torok, S., Auer, I., Bohm, R., Gullett, D., Vincent, L., Heino, R., Tuomenvirta, H., Mestre, O., Szentimrey, T., Salinger, J., Folland, E. J., Hanssen-Bauer, I., Alexandersson, H., Jones, P., Parker, D., *Homogeneity adjustments of in situ atmospheric climate data: a review*. Int. J. Climatol., 1998.
- Peterson, T. C., Zhang, X., Brunet-India, M., Vázquez-Aguirre, J. L., *Changes in North American extremes derived from daily weather data*, Journal of Geophysical Research, 2008.
- Philander, S. G., *El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation*, Academic Press, 1990.
- Picaut, J., Masia F., Du Penhoat Y., *An advective-reflective conceptual model for the oscillatory nature of the ENSO*, Science, 1997.
- Pielke, R. A., Landsea, C. W., *La Niña, El Niño, and Atlantic hurricane damages in the United States*, Bull. Am. Meteorol. Soc., 8010, 1999.
- Reglamento Interior de CONAGUA publicado en el *Diario Oficial de la Federación* el 12 de octubre de 2012, Artículo 58, Fracción IX.
- Retallack, B. J., *Compendio de apuntes para la formación del personal meteorológico de la clase III*. No. 291, OMN, 1971.
- Reyes, Sergio, *Introducción a la Meteorología*, Baja California, México, CICESE, 2002, 428 pp.
- Ropelewski, C. F., Halpert, M. S., *North American precipitation and temperature patterns associated with the El Niño/ Southern Oscillation (ENSO)*, Mon. Wea. Rev., 1986.
- Roque Márquez, *Compendio de apuntes para formación del personal meteorológico de la clase IV*, OMM / SENEAM, Curso actualización de control de tránsito aéreo, 2005.
- Rosengaus M., Michel. *Efectos destructivos de ciclones tropicales*, México, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, MAPFRE, 1998.
- Santamaría, J., "Forzamiento radiativo y cambios químicos en la atmósfera", en XI Programa de Promoción de la Cultura Científica y Tecnológica, *Revista Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, Vol. 104, No. 1, Valverde 22, Madrid, 2010.
- Santamaría J., "Forzamiento radiactivo y cambios químicos en la atmósfera", *Guía de prácticas climatológicas*, OMM, Ginebra, *Revista Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, Volumen 101, No. 1, tercera edición, 2011.

- Schopf, P. S., Suárez, M. J., *Vacillations in a coupled ocean-atmosphere model*, J. Atmos. Sci., 1988.
- Shabbar, A., Khandekar, M., *Canadian precipitation patterns associated with the Southern Oscillation*, EUA, Journal of Climate, 1997.
- Shabbar, A., Khandekar, M., *The impact of el Nino-Southern oscillation on the temperature field over Canada: Research note*, Atmosphere-Ocean, 1996.
- Sheinbaum P. J., *Current theories on El Niño-southern oscillation: A review*, Geofísica Internacional, 2003.
- Torrence, C., Webster, P. J., *The Annual Cycle of Persistence in the El Nino-Southern Oscillation*, Q. J. Roy. Met. Soc., 1998.
- Turrent, C., Cavazos, T., *Role of the land-sea thermal contrast in the interannual modulation of the North American Monsoon*, Geophys, 2009.
- Trenberth, K. E., *The definition of El Niño*, Bull., 1997.
- Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., Kiehl, J., *Earth's Global Energy Budget*, EUA, Bulletin American Meteorological Society, 2009.
- Trenberth, K. E., Jones, P. D., Ambenje, P. R., entre otros, "Observations: Surface and Atmospheric Climate Change", en: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, Cambridge, RU y Nueva York, EUA, 2007.
- Trenberth, K. E., Stepaniak, D. P., *Indices of El Niño evolution*, Journal of Climate, 14, 2001.
- Vazquez, J., "Guía para el cálculo y uso de índices de cambio climático en México", *Desarrollada en el marco del proyecto Fortalecimiento de Capacidades en Detección de Cambio Climático en México*, México, Instituto Nacional de Ecología, 2010.
- Vega, E., *Consideraciones sistémicas en la evaluación académico-administrativa en instituciones de educación básica en México*, México, Instituto Politécnico Nacional, 2011.
- Vide Martín, J., Olcina Cantos, J., *Tiempos y climas mundiales*, España, Oikos-Tau, 1996.
- Vivó Escoto, Jorge, *The Handbook of Middle American Indians*, EUA, University of Texas Press, 1964.
- Walker, G. T., Bliss, E. W., *World Weather VI*, Mem. Roy. Meteor. Soc., 1937.
- Wang, C., Weisberg, R. H., *The 1997-98 El Niño evolution relative to previous El Niño events*, Journal of Climate, 2000.
- Wang, C., Weisberg, R. H., Virmani, J. I., *Western Pacific interannual variability associated with the El Niño-Southern Oscillation*, J. Geophys. Res., 1999.
- Wanielista, Martin P., Kersten, Robert, *Hydrology Water Quantity and Quality Control*, 2ª ed., Canadá, John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- Webster, P. J., Yang, S., *Monsoon and ENSO: Selectively Interactive Systems*, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1992.
- Weisberg, R. H., Wang, C., *A western Pacific oscillator paradigm for the El Niño- Southern Oscillation*, Geophys. Res. Lett., 1997.
- Willett, H. C., *American Air Mass Properties*, EUA, Papers in Physical Oceanography and Meteorology, 1933.
- Yu, J. Y., Kao H. Y., *Decadal Changes of ENSO Persistence Barrier in SST and Ocean Heat Content Indices: 1958-2001*, J. Geophys. Res., 2007.
- Zebiak, S. E., Cane M. A., *A model El Niño-Southern Oscillation*, Monthly Weather Review, 1987.

## WEB

- AFP, “La contaminación del aire mata cada año a dos millones de personas”, *El Mundo.es*, disponible en <<http://www.elmundo.es/elmundo/2009/03/23/ciencia/1237802000.html>>, 2009.
- Ambientum, “La circulación general de la atmósfera”, *Ambientum, el portal profesional del Medio Ambiente*, disponible en <[http://www.ambientum.com/enciclopedia\\_medioambiental/atmosfera/La-circulacion-general-de-la-atmosfera.asp](http://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/atmosfera/La-circulacion-general-de-la-atmosfera.asp)>, 2015.
- Benito Marcote Martin, “Efecto del Sol sobre la atmósfera terrestre”, disponible en <[http://www.am.ub.edu/~bmarcote/docs/F\\_el\\_Sol\\_en\\_la\\_atmosfera\\_terrestre.pdf](http://www.am.ub.edu/~bmarcote/docs/F_el_Sol_en_la_atmosfera_terrestre.pdf)>, enero, 2011.
- Biodiversidad de México*, SEMARNAT, disponible en <<http://cruzadabosquesagua.semarnat.gob.mx/iii.html>>, consultado el 7 de octubre del 2007.
- Carlos Fredo, “Tormenta de arena azota Texas”, *StarMedia*, México, disponible en <<http://noticias.starmedia.com/desastres-naturales/tormenta-arena-azota-texas.html>>, 2011.
- Cavazos, T., y otros autores, “Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la quinta comunicación nacional”, *Informe Final del Proyecto al INECC*, disponible en: <<http://escenarios.inecc.gob.mx/index2.html>>
- EFE, “La nube de ceniza volcánica cierra 15 aeropuertos españoles”, *Qué!*, disponible en <<http://www.que.es/ultimas-noticias/espana/201005080054-nube-ceniza-cierra-aeropuertos-norte.html>>, 2010.
- Edgar G., Pavia, Federico Graef, Jorge Reyes, “PDO–ENSO Effects in the Climate of Mexico”, Ensenada, México, CICESE, disponible en <<http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/JCLI4045.1>>, 2006.
- Eduardo Mosqueira, “Los españoles somos culpables de que el año empiece el 1 de Enero y por qué este no coincide con la Navidad y el Solsticio de Invierno”, *El blog de Eduardo Mosqueira*, disponible en <<http://emosqueira.com/tag/ano-nuevo/>>, 2010.
- Geraldina T. Golup, “Tormentas eléctricas, rayos y pararrayos”, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Depto. Física, disponible en <<http://www.fceia.unr.edu.ar/~fisica3/Tormentas.pdf>>, 2002.
- Jesús Manuel Macías, “Climatología de tornados”, *Investigaciones Geográficas*, boletín No. 83, Instituto de Geografía de la UNAM, disponible en <<http://www.revistas.unam.mx/index.php/rig/article/view/35726>>, 2014.
- Jesús Manuel Macías, Asunción Avendaño, Marios Barrios, Magdalena Hernández, Rubén Galicia, “El tornado de Piedras Negras del 24 de abril de 2007”, CIESAS, disponibles en <<http://ciatts.ciesas.edu.mx/Documentos/Reportes/Reporte%20del%20tornado%20Piedras%20Negras/Reporte%20del%20Tornado%20de%20Piedras%20Negras.pdf>>, 2007.
- José Luis Pascual Blázquez, “La historia no contada de la Meteorología”, disponible en <<http://astrofactoria.webcindario.com/>>
- Kristen Erickson, “¿Qué causa las estaciones?”, NASA, *Space Place*, disponible en <<http://spaceplace.nasa.gov/seasons/sp/>>, 2015.
- Lorrain Giddings, Margarita Soto, “Teleconexiones y precipitación en América del Sur”, Instituto de Ecología, S.A., Xalapa, Veracruz, *Revista de Climatología*, disponible en: <<http://webs.ono.com/reclim2/reclim06b.pdf>>, 2006.
- M. Castro, “Los modelos Climáticos Globales. Presentación en Proyección regional de escenarios de Cambio Climático”. Técnicas y Proyectos en Curso. Universidad de Cantabria, disponible en <[http://www.meteo.unican.es/courses/2007\\_cursoRegionalizacion\\_files/2\\_1\\_Castro.pdf](http://www.meteo.unican.es/courses/2007_cursoRegionalizacion_files/2_1_Castro.pdf)>
- Magnun, L. J., McClurg, D. C., Stratton, L. D., Soreide, N. N., McPhaden, M. J., *The tropical atmosphere ocean (TAO)*, 1998, disponible en <[http://www.pmel.noaa.gov/tao/proj\\_over/pubs/argos.html](http://www.pmel.noaa.gov/tao/proj_over/pubs/argos.html)>, consultado el 15 de marzo de 2015.

- Manuel de Castro, “Los modelos climáticos globales”, ICAM-UCLM, Toledo, disponible en <[http://www.meteo.unican.es/courses/2007\\_cursoRegionalizacion\\_files/2\\_1\\_Castro.pdf](http://www.meteo.unican.es/courses/2007_cursoRegionalizacion_files/2_1_Castro.pdf)>, 2007.
- Martín Jiménez, Lucía Matías, Óscar A. Fuentes, Ricardo Prieto, “Ciclones tropicales”, Centro Nacional de Prevención de Desastres, disponible en <<http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/5-FASCCULOCICLONESTROPICALES.PDF>>, 2014.
- Martínez, J., Fernández, B. A., *Cambio Climático. Una visión desde México*, Instituto Nacional de Ecología, 1ª ed., 2004, disponible en <<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/download/437.pdf>>, consultado el 17 de marzo de 2015.
- Mathieu Hautefeuille, “El vello nasal como indicador de nivel de contaminación”, Curious mAt, disponible en <<http://curiousmat.blogspot.mx/2013/01/el-vello-nasal-como-indicador-de-nivel.html>>, 2013.
- METED (2011) *Introducción a la meteorología tropical*, 2ª ed., UCAR, 2011, disponible en: <<http://www.meted.ucar.edu>>, consultado 16 de marzo de 2015.
- Miguel Gilarte Fernández, “Así cambiará la Tierra cuando la Luna se aleje”, ABC.es, disponible en <<http://www.abc.es/ciencia/20130529/abci-cambiara-tierra-cuando-luna-201305281711.html>>, 2013.
- NOAA, National Weather Service, Climate Prediction Center, EUA, 2005, 2012, 2015, disponible en <[http://www.cpc.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily\\_ao\\_index/teleconnections.shtml](http://www.cpc.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/teleconnections.shtml)>.
- OMS, “Conferencia de la OMS sobre salud y clima. Un programa operacional”, OMS, Ginebra, disponible en: <<http://www.who.int/es/>>, 2014.
- Redacción, “Halo Solar, señal del cielo en tiempo de preocupaciones”, *Diario Digital RD*, disponible en <<http://diariodigital.com.do/2013/04/06/halo-solar-senal-del-cielo-en-tiempo-de-preocupaciones/>>, 2013.
- Redacción NBC News, “Towering dust storm smothers Phoenix area”, *NBC News*, disponible en <<http://www.nbcnews.com/news/weather/towering-dust-storm-smothers-phoenix-area-n165466>>.
- Roel Ayala Mata, Roel I., Ayala Ruiz, “La contracorriente marina ecuatorial”, Coordinación del Servicio Meteorológico Nacional, disponible en <<http://www.divulgameteo.es/fotos/meteoroteca/Contracorriente-marina-ecuatorial.pdf>>
- Roger M. Wakimoto, James W. Wilson, “Non-supercell Tornadoes”, *Monthly Weather Review*, disponible en <<http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0493%281989%29117%3C1113%3ANST%3E2.0.CO%3B2>>, 1989.
- RSS, “Halo Solar”, *El Diario Montañés*, disponible en <<http://blogs.eldiariomontanes.es/meteorologia-para-todos/2010/03/17/halo-solar/>>, 2010.
- Stewart, R. H., *Introduction to Physical Oceanography*, Department of Oceanography, Texas A & M University, College Station, Texas, disponible en <[http://oceanworld.tamu.edu/resources/ocng\\_textbook/PDF\\_files/book.pdf](http://oceanworld.tamu.edu/resources/ocng_textbook/PDF_files/book.pdf)>, 2008.
- The COMET, *Introduction to Tropical Meteorology*, 2ª ed., 2015, disponible en <<https://www.meted.ucar.edu/tropical/>>.
- Vasquez, Tim, 2002. *Weather Forecasting Handbook*. Weather Graphics Technologies, 2002, disponible en <<https://www.siac.gov.co/contenido/contenido.aspx?catID=688&conID=1261&pagID=1424>>, consultado el 17 de marzo de 2015.
- Verónica Casanova, “La Tierra alcanza el 5 de julio su afelio. ¿Por qué no coincide con el solsticio?”, *Astrofísica y Física*, disponible en <<http://www.astrofisicayfisica.com/2013/07/la-tierra-alcanza-el-5-de-julio-su.html>>, 2013.

## SITIOS DE INTERES

AEMET

<http://www.aemet.es>

ATL / EL PORTAL DEL AGUA DESDE MÉXICO

<http://atl.org.mx/>

CENAPRED

<http://www.cenapred.gob.mx/>

COMET METED

[https://www.meted.ucar.edu/index\\_es.php](https://www.meted.ucar.edu/index_es.php)

CONABIO

<http://www.conabio.gob.mx>

EARTH OBSERVATORY

<http://earthobservatory.nasa.gov>

EXPERIMENTO DEL MONZÓN DE AMÉRICA DEL NORTE

<http://www.nssl.noaa.gov/projects/pacs/web/html/NAME/SPANISH/>

HURRICANE RESEARCH DIVISION

<http://www.aoml.noaa.gov/hrd/>

L'UNIVERSO... PER TUTTI!

<http://astronomia.com/>

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC  
ADMINISTRATION

[http://www.noaanews.noaa.gov/stories2014/20140410\\_hurricanenameretired.html](http://www.noaanews.noaa.gov/stories2014/20140410_hurricanenameretired.html)

NATIONAL WEATHER SERVICE-NATIONAL HURRICANE  
CENTER

<http://www.nhc.noaa.gov/>

PROGRAMA NACIONAL CONTRA LA SEQUÍA

<http://www.pronacose.gob.mx/>

RADIO EL TIEMPO DEL TIEMPO / DIVULGA METEO

<http://www.divulgameteo.es/radio/1/12.html>

SMN-CONAGUA

<http://smn.conagua.gob.mx/>

USEPA

<http://www.epa.gov>

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION

[http://www.wmo.int/pages/prog/www/tcp/index\\_en.html](http://www.wmo.int/pages/prog/www/tcp/index_en.html)

## CRÉDITOS FOTOGRÁFICOS

Portada: Associated Press (AP)

p. 4 Presidencia de la República Mexicana

p. 6 Thinkstock

p. 8 Thinkstock

p. 10 Thinkstock

p. 11 Archivo Cuartoscuro / Foto: Diego Simón Sánchez

p. 12 Observatorio Nacional Archivo SMN/CONAGUA

p. 13 CONAGUA

p. 14 Infografía: Juan Carlos Fleicer / Arte Agencia Promotora de Publicaciones S.A de C.V.

p. 15 Gráfico SMN/CONAGUA

p. 16-17 Infografía: Juan Carlos Fleicer / Arte Agencia Promotora de Publicaciones S.A de C.V.

p. 18 Infografía: Juan Carlos Fleicer / Arte Agencia Promotora de Publicaciones S.A de C.V.

p. 19 Archivo SMN/Conagua / Infografía: Juan Carlos Fleicer / Arte Agencia Promotora de Publicaciones S.A de C.V.

p. 20 Archivo SMN/CONAGUA

p. 21 Archivo SMN/CONAGUA

p. 22 Archivo SMN/CONAGUA

p. 23 Archivo Milenio. Foto: Octavio Hoyos y SMN/CONAGUA

p. 24 Archivo SMN/CONAGUA

p. 25 Archivo SMN/CONAGUA

p. 26 Thinkstock

p. 27 Infografía: Juan Carlos Fleicer / Arte Agencia Promotora de Publicaciones S.A de C.V.

p. 28 Archivo SMN/CONAGUA

p. 29 Archivo SMN/CONAGUA

p. 30 Thinkstock

p. 31 Archivo SMN/CONAGUA

p. 32 Archivo Cuartoscuro/Foto: María José Martínez

p. 33 Archivo Cuartoscuro/Foto: Saúl López

p. 34 Thinkstock

p. 35 Thinkstock

p. 36 Thinkstock

p. 37 Thinkstock

p. 38 Thinkstock

p. 39 Thinkstock

p. 40-41 Infografía: Juan Carlos Fleicer / Arte Agencia Promotora de Publicaciones S.A de C.V.

p. 42 Thinkstock

p. 43 Thinkstock

- p. 44 Thinkstock  
 p. 45 Thinkstock  
 p. 46 Thinkstock  
 p. 47 Thinkstock  
 p. 48 Thinkstock  
 p. 49 Thinkstock  
 p. 50 Thinkstock  
 p. 51 Thinkstock  
 p. 52 Archivo SMN/CONAGUA  
 p. 53 Archivo Cuartoscuro / Foto: Enrique Ordoñez  
 p. 54 Archivo Cuartoscuro / Foto: Isabel Mateos  
 p. 55 Archivo Milenio. Foto: Octavio Hoyos  
 p. 56 Thinkstock  
 p. 57 Thinkstock  
 p. 58 Thinkstock  
 p. 59 Thinkstock  
 p. 60 Thinkstock  
 p. 61 Thinkstock  
 p. 62 Thinkstock  
 p. 63 Thinkstock  
 p. 64 Infografía: Juan Carlos Fleicer / Arte Agencia Promotora de Publicaciones S.A de C.V.  
 p. 65 Thinkstock  
 p. 66 Thinkstock  
 p. 67 Thinkstock  
 p. 68 Thinkstock  
 p. 69 Thinkstock  
 p. 70 Thinkstock  
 p. 71 Thinkstock  
 p. 72 Thinkstock  
 p. 73 Thinkstock  
 p. 74 Thinkstock  
 p. 75 Thinkstock  
 p. 76 – 77 Infografía: Juan Carlos Fleicer / Arte Agencia Promotora de Publicaciones S.A de C.V.  
 p. 79 Thinkstock  
 p. 80 Thinkstock  
 p. 81 Thinkstock  
 p. 82 Thinkstock  
 p. 83 Thinkstock  
 p. 84 Archivo Cuartoscuro / Foto: Armando Monroy (arriba)  
 p. 84 Archivo Cuartoscuro / Foto: María José Martínez (abajo)  
 p. 85 Archivo Cuartoscuro / Foto: Fernando Carranza (arriba)  
 p. 85 Archivo Cuartoscuro / Foto: Rashide Frías (abajo)  
 p. 86 Janne  
 p. 87 Thinkstock  
 p. 88 Thinkstock  
 p. 89 Thinkstock  
 p. 90 Thinkstock  
 p. 91 Thinkstock  
 p. 92 Thinkstock  
 p. 93 Thinkstock  
 p. 94 Thinkstock  
 p. 95 Thinkstock  
 p. 96 Thinkstock  
 p. 97 Thinkstock  
 p. 98 Thinkstock  
 p. 99 Thinkstock  
 p. 100 Thinkstock  
 p. 102 Archivo Milenio. Foto: Milenio Tamaulipas  
 p. 103 Thinkstock  
 p. 104 Infografía: Juan Carlos Fleicer / Arte Agencia Promotora de Publicaciones S.A de C.V.  
 p. 105 Archivo Cuartoscuro / Foto: Rashide Frías  
 p. 106 - 107 Infografía: Juan Carlos Fleicer / Arte Agencia Promotora de Publicaciones  
 p. 108 Thinkstock  
 p. 109 Thinkstock  
 p. 110 Gráfico: Juan Carlos Fleicer / Arte Agencia Promotora de Publicaciones S. A. De C.V.  
 p. 111 Thinkstock  
 p. 112 Thinkstock  
 p. 113 Thinkstock  
 p. 114-115 Infografía: Juan Carlos Fleicer / Arte Agencia Promotora de Publicaciones S.A de C.V.  
 p. 116 Thinkstock  
 p. 117 Archivo Milenio. Foto: Milenio Tamaulipas  
 p. 118 Archivo Milenio. Foto: Milenio Coahuila  
 p. 119 Thinkstock  
 p. 120 Archivo Cuartoscuro / Foto: Misael Valtierra  
 p. 121 Archivo Cuartoscuro / Foto: Ernesto Moreno  
 p. 122-123 Infografía: Juan Carlos Fleicer / Arte Agencia Promotora de Publicaciones S.A de C.V.  
 p. 123 Thinkstock  
 p. 124 Thinkstock  
 p. 125 Thinkstock  
 p. 126 Thinkstock  
 p. 127 Thinkstock  
 p. 128 Thinkstock  
 p. 129 Thinkstock  
 p. 130 Thinkstock  
 p. 131 Thinkstock  
 p. 132 Thinkstock  
 p. 133 Thinkstock  
 p. 134 Thinkstock  
 p. 135 Thinkstock  
 p. 136 Thinkstock  
 p. 137 Thinkstock  
 p. 138 Archivo Milenio. Foto: Milenio Coahuila  
 p. 139 Thinkstock  
 p. 140- 141 Infografía: Juan Carlos Fleicer / Arte Agencia Promotora de Publicaciones S.A de C.V.  
 p. 142 Thinkstock  
 p. 143 Thinkstock  
 p. 144 Thinkstock  
 p. 145 Thinkstock  
 p. 147 Thinkstock  
 p. 148 Archivo Cuartoscuro / Foto: Especial

p. 149 Archivo SMN/CONAGUA  
p. 150 Archivo SMN/CONAGUA  
p. 152-153 Infografía: Juan Carlos Fleicer / Arte Agencia Promotora de Publicaciones S.A de C.V.  
p. 154 Archivo Cuartoscuro / Foto: Rashide Frías  
p. 155 Infografía: Juan Carlos Fleicer / Arte Agencia Promotora de Publicaciones S.A de C.V.  
p. 156 Thinkstock  
p. 157 Thinkstock  
p. 158-159 Infografía: Juan Carlos Fleicer / Arte Agencia Promotora de Publicaciones S.A de C.V.  
p. 160 Archivo Cuartoscuro / Foto: Félix Márquez  
p. 161 Thinkstock  
p. 162 Thinkstock  
p. 163 Thinkstock  
p. 164 Thinkstock

p. 165 Thinkstock  
p. 166 Thinkstock  
p. 167 Thinkstock  
p. 168 Archivo SMN/CONAGUA  
p. 169 Archivo SMN/CONAGUA  
p. 170 Thinkstock  
p. 172-173 Thinkstock  
p. 174 Thinkstock  
p. 175 Archivo Milenio. Foto: Mónica González  
p. 176 Thinkstock  
p. 177 Thinkstock  
p. 178 Archivo Milenio. Foto: Octavio Hoyos  
p. 179 Thinkstock  
p. 181 Archivo SMN/CONAGUA  
p. 182 Archivo SMN/CONAGUA

## SIGLAS Y ACRÓNIMOS

### A

Ac. Altocúmulos  
AEMET. Agencia Española de Meteorología  
AMDAR. Aircraft Meteorological Data Relay  
AMO. Atlantic Multidecadal Oscillation  
APEC. Asia-Pacific Economic Cooperation  
AR IV. Asociación Regional IV  
As. Altostratos

### C

CAPE. Energía Potencial Disponible para Convección  
Cb. Cumulonimbos  
Cc. Cirrocúmulos  
CCA. Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM  
CGSMN. Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional  
Ci. Cirrus  
CIESAS. Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social  
CMMW. Centro Meteorológico Mundial de Washington  
CMNUCC. Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático  
CNTM. Centro Nacional de Telecomunicaciones Meteorológicas  
CODIR. Codificación de Información de Radar (Código CODIR)  
CONABIO. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad  
CONAGUA. Comisión Nacional del Agua  
CPC. Centro de Predicción del Clima

CPTEC. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos  
Cs. Cirrstratos  
Cu. Cúmulus  
CRU. Climatic Research Unit

### D

DGSMN. Dirección General del Servicio Meteorológico Nacional  
DT. Diagrama Termodinámico  
DVIP. Digital Video Integrator Processor

### E

EA. Patrón del Atlántico Este  
ECMWF. European Centre for Medium-Range Weather Forecast  
EEC. Enterprise Electronics Corporation  
EMAS. Estaciones Meteorológicas Automáticas  
ENP. Escuela Nacional Preparatoria  
ENSO. *El Niño* Southern Oscillation  
EP-NP. Patrón del Pacífico Este- Pacífico Norte  
ERIS. Estaciones Receptoras de Imágenes de Satélites Meteorológicos  
ESIMES. Estaciones Sinópticas Meteorológicas

### F

FAM. Fuerza Aérea Mexicana  
FOPREDEN. Fondo para la Prevención de Desastres Naturales

## G

GARP. Global Atmospheric Research Program  
 GEI. Gases de Efecto Invernadero  
 GFS. Global Forecasting System  
 GOES. Geostationary Operational Environmental Satellite  
 GOS. Global Observing System  
 GPCC. Global Precipitation Climatology Centre  
 GTS. Global Telecommunication Center

## I

ICU. Isla de Calor Urbana  
 IIE. Instituto de Investigaciones Eléctricas  
 IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change  
 IRI. Instituto Internacional de Investigación del Clima y la Sociedad

## L

LGC. Laboratorio de Geodinámica Computacional

## M

MCH. Meteorología, Climatología e Hidrología  
 MJO. Madden-Julian Oscillation  
 MM5. Mesoescala Generación 5  
 MMSC. Marco Mundial para los Servicios Climáticos  
 MSM. Monitor de Sequía en México

## N

NACSP. North American Climate Services Partnership  
 NADM. Monitor de Sequía de América del Norte  
 NCAR. National Center for Atmospheric research  
 NCEP. National Center for Environmental Prediction  
 NDVI. Normalized Difference Vegetation Index  
 NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration  
 Ns. Nimbostratos  
 NSSL. National Severe Storms Laboratory

## O

OMC. Observatorio Meteorológico Central  
 OMM. Organización Meteorológica Mundial  
 ONU. Organización de las Naciones Unidas

## P

PDO. Pacific Decadal Oscillation  
 POES. Polar Operational Environmental Satellite  
 PNA. Patrón del Pacífico de Norteamérica  
 PNUD. Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo  
 PPI. Plan Position Indicator  
 PRONACOSE. Programa Nacional contra la Sequía

## Q

QBO. Quasi-Biennial Oscillation

## R

RHI. Range High Indicator  
 ROMS. Red de Observatorios Meteorológicos Sinópticos  
 RPM. Rapid Precision Model

## S

SARH. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos  
 Sc. Stratocumulus  
 SEDESOL. Secretaría de Desarrollo Social  
 SEMAR. Secretaría de Marina  
 SEMARNAT. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales  
 SENEAM. Servicio a la Navegación del Espacio Aéreo Mexicano  
 SIAFEG. Sistema de Alerta Fitosanitaria del Estado de Guanajuato  
 SIAT-CT. Sistema de Alerta Temprana para Ciclones Tropicales  
 SIG. Sistemas de Información Geográfica  
 Sinaproc. Sistema Nacional de Protección Civil  
 SMHN. Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales  
 SMN. Servicio Meteorológico Nacional  
 SPI. Standardized Precipitation Index  
 St. Stratus

## T

TAO. Tropical Atmosphere Ocean  
 TGS. Teoría General de los Sistemas  
 TMS. Temperatura de la Superficie del Mar  
 TUC. Tiempo Universal Coordinado

## U

UCAR. University Corporation for Atmospheric Research  
 UNAM. Universidad Nacional Autónoma de México

## V

VHI. Vegetation Health Indices

## W

WRF. Weather Research and Forecasting  
 WSI. Weather Services International

## Z

ZCIT. Zona de Convergencia Intertropical

Este libro fue creado en Adobe InDesign CS6, con la fuente tipográfica Soberana Sans en sus diferentes pesos y valores, y se utilizó papel con certificación medioambiental para su elaboración. Se imprimió en marzo de 2016 en los talleres de la Agencia Promotora de Publicaciones S.A. de C.V., Avenida Eugenio Garza Sada 2245, Col. Roma, CP 64700; Monterrey, N.L.; México.

El tiraje fue de 4 500 ejemplares.

El **Agua** como **Derecho Humano**

[www.gob.mx/semarnat](http://www.gob.mx/semarnat)

[www.gob.mx/conagua](http://www.gob.mx/conagua)